

Title	物体認識の脳内表現に関する心理学的および神経機能画像法的研究(Dissertation_全文)
Author(s)	杉尾, 武志
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2000-03-23
URL	http://dx.doi.org/10.11501/3167439
Right	
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	author

物体認識の脳内表現に関する
心理学的および神経機能画像法的研究

杉尾 武志

2000 年 1 月

要約

生物が環境内で生存していくためには、膨大な視覚情報の中から行動目的に適合した物体を見つけ出して、その物体に関する情報を獲得する必要がある。このように、見ている物体が何であるかを理解ための認知的機能は視覚的物体認識と呼ばれ、すべての認知の基盤となっている。本論文は、人間が自分自身の視点の変化に影響されずに視覚的物体認識を行うために、物体が脳内でどのように表現されている必要があるかという問題を、2つの異なる研究手法(心理実験と機能的核磁気共鳴画像法 fMRI; functional magnetic resonance imaging)により明らかにした。視点変化に対する認識の不変性(視点不変性)は、頑健で効率的な認識を実現するために必要不可欠な認識系の特性である。そのために、視点不変性を達成するために必要な脳内表現の性質を調べることは、人間が視覚情報のどのような特性に基づいて認識を行っているかを考える上で大きな意味を持っている。

第1章では、本研究における基本的立場を述べた。一般に、物体の見かけの変化においては、物体の違いによる変化と観察条件の違いによる変化の2種類の原因による変化が混合している。このことから、視点不変性を達成するために認識系は、これらの2つの要因を独立に知覚する必要がある。物体の違いによる変化は、物体固有の幾何学的特性を反映した同定に必要な形状情報であり、形状-同定情報と呼ばれる。それに対して、観察者に対して物体がどのような方位にあるかを示した情報は、方位-変換情報と呼ばれる。視点不変な形状知覚は、こうした2つの要因を生成された視覚画像から独立に推定していく処理過程であると考えられる。

第2章では、意味を持たない線図形から構成された刺激集合に対して、形状-同定情報と方位-変換情報とが独立に知覚されることを、類似性判断課題により明らかにした。一般に、方位は知覚形状に対して、どのような空間的記述(上下方向の割り当て)がなされるかによって決定されと考えられている。この時、方位に関する情報を与えるような特徴(例：車にとっての「タイヤ」)が形状内のどこに位置しているかと、特徴同士がどのようにして物体固有な形状を形成しているかは独立であり、脳内では異なる空間コードとして表現されている可能性がある。実験では、被験者に形状-同定情報のみを変化させた条件(SV)と方

位 - 変換情報のみを変化させた条件(TV),そして両者を変化させた条件(SVTV)のそれぞれについて類似性判断を行わせた。まず,各条件において得られた主観的類似度行列から,多次元尺度構成法(MDS; multi-dimensional scaling method)により被験者の内部表現が復元された。その結果,SV条件とTV条件で,それぞれ形状-同定情報と方位-変換情報を表現した付置が見出された。さらに,SVTV条件において,導出された4次元解の中にそれぞれの単独条件に対応する付置を,独立した部分空間として見出すことが出来た。このことは,図形の形状がこれら2種類の情報に基づいて知覚されていることを示している。

第3章および第4章では,再認記憶課題を用いて,方位 - 変換情報が形状 - 同定情報の符号化に対して,どのような役割を担っているかを検討した。その結果,構造的に正立ではない(=「傾いている」と認知される)形状を学習する場合に,正立方位における形状が内的に自動生成されていることが明らかになった。さらに,「傾いている」形状に対して構造的情報に基づいた符号化を行うことで,知覚形状が異なっても同じ構造を持つ物体として学習することが可能になることが示唆された。

第5章では,fMRIにより,日常的に見慣れた三次元物体の画像を観察する時の見えの良さ(典型性)の違いによる,大脳領域の活動の差を計測することによって,視点不変性を達成している脳内の神経機構の性質を明らかにした。その結果,非典型的視点から物体を観察したときに,両側の後部頭頂皮質と運動前野腹側部の活動がみられることが明らかになった。前者が視空間的処理に関わっているのに対して,後者は物体特有の動作スキーマを保持していることが神経生理学的データから示唆される。このことから,非典型的景観からの認識において,ボトムアップ的な視空間的処理とトップダウン的な感覚運動的経験の利用が相補的に働いていると考えられる。

最後に第6章では,心理実験とfMRIによる刺激実験の総合的考察を行い,今後の理論的展望を述べた。心理実験から,人間が知覚形状の形状-同定情報と方位-変換情報に関して,それぞれ独立した表現空間を持っていることが明らかにされた。さらにfMRI実験から,非典型的視点から物体認識を行うとき,脳内で意味的知識から独立した構造的知識と視覚以外の感覚様相における物体の経験が利用されている事が明らかにされた。このように,人間は多次元的な構造的知識を事前に保持しており,知覚形状を最もよく説明する構造を選択することで視点不変性を達成していることが示唆された。

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 視点変化に対する認識の不変性	2
1.3 本研究における基本的立場	3
1.4 形状 - 同定情報と方位 - 変換情報の処理の独立性	5
1.5 幾何学的構造による方位 - 変換情報の推定	9
1.6 方位 - 変換情報の認識に対する役割	12
1.7 論文の構成	13
第2章 形状 - 同定情報と方位 - 変換情報との独立性	15
2.1 はじめに	15
2.2 心理実験	18
2.2.1 目的	18
2.2.2 方法	18
2.2.3 結果	27
2.2.4 考察	31
第3章 形状知覚における自動的なプロトタイプ生成	35
3.1 はじめに	35
3.2 心理実験	35
3.2.1 目的	35
3.2.2 方法	36
3.2.3 結果	38
3.2.4 考察	40
第4章 形状-同定情報の符号化における方位-変換情報の影響	42
4.1 はじめに	42
4.2 心理実験	43
4.2.1 目的	43

4.2.2	方法	44
4.2.3	結果	46
4.2.4	考察	47

第 5 章 機能的 MRI を用いた視覚的物体認識の視点依存性の脳内機構 50

5.1	はじめに	50
5.2	刺激実験	53
5.2.1	目的	53
5.2.2	方法	54
5.2.3	統計解析	57
5.2.4	結果	59
5.2.5	考察	60
5.3	心理実験(1)	63
5.3.1	目的	63
5.3.2	方法	64
5.3.3	結果	65
5.3.4	考察	67
5.4	心理実験(2)	69
5.4.1	目的	69
5.4.2	方法	69
5.4.3	結果	70
5.4.4	考察	71

第 6 章 総合的考察 73

謝辞 80

参考文献 81

研究業績 88

第 1 章 序論

1.1 はじめに

本論文は、視覚的物体認識に関与している脳内表現の性質を、心理学および神経機能画像法的手法(機能的核磁気共鳴画像法 fMRI; functional magnetic resonance imaging)によって明らかにすることを目的とする。特に、観察者の視点移動による物体の知覚された見かけの形状の変化に対して、認識の不変性を達成するために必要とされる表現の性質の問題を中心に扱う。

外部世界に存在する物体が何であるかを理解するためには、脳内に何らかの形でその物体に関する表現があらかじめ保持されていなければならない。同じ形が知覚されても、物体に関してどのような表現を保持しているかにより、どのように認識されるかは異なるものになる。例えば、図 1.1 に示したような Jastrow の意味反転図形は、視覚的物体認識における表現の性質の重要性を示している。このような図形は、全く同じ形であるにも関わらず、「アヒル」として認識されたり、「ウサギ」として認識されたりする。

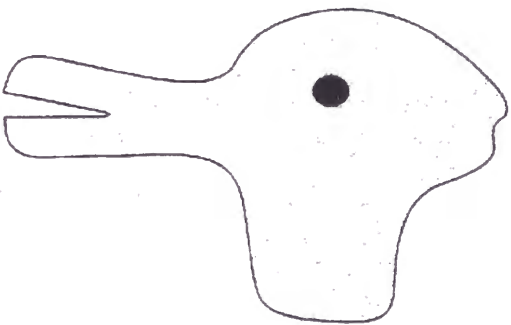


図 1.1: Jastrow の意味反転図形。同じ図形であるにも関わらず、「アヒル」と「ウサギ」の 2 つの異なる対象を見出すことができる。

このような認識の在り方は、少なくとも次の 2 つを示唆している。1 つは、あらかじめ脳内に「アヒル」や「ウサギ」に関する表現が存在していなければ、この線画を「アヒル」としても「ウサギ」としても認識することはできないという点である。もう 1 つは、このように極めて単純化された線画であっても、認識を

行うには十分であるという点である。つまり、人間が視覚的物体認識を行うためには、あらかじめ物体に関する何らかの表現が獲得されている必要があると同時に、その表現が写真のような現実の外部世界における物体のレプリカである必要性は必ずしもないということである。

1.2 視点変化に対する認識の不変性

日常生活においては、見ている物体が何であるかを理解することは極めて容易である。そのために、視点変化に対して不変な認識を達成することが困難であることは、あまり意識されない。しかし、仮に認識系が異なる網膜像がすべて異なる物体に対応していると判断したならば、重大な問題が生じることになる。つまり、同じ物体であっても異なる位置や方位で現われる度に、異なる物体であると誤って認識してしまうことが起こりうる。

適応的観点からも、様々な観察状況の変化に対して、安定した視覚的物体認識を行う能力は必要不可欠である。通常、人間は自由に環境内を移動することが可能であることから、視点不変な認識を行うことができないことは、生存上大きな問題となる。

Marr は、視覚的物体認識を含めた高次視覚について初めて計算論的な定式化を行った(Marr, 1982)。Marr は、見るということは、網膜像から外部世界に関するシンボリックな記述や表現の計算であると主張した。シンボリックな記述は、同時に外部世界に関する最も効率的な表現となっていると考えられる。したがって、計算論的立場からは、認識に関与している表現の特性と表現の形成段階で、どのような計算を行う必要があるのかを明らかにしていくことが、認識研究の重要なアプローチとなる。

これまでの研究における視点不変性に関与している表現の性質に関する考え方は、大きく次の 2 つに分けることが出来る。1 つは、物体を視点に依存した見かけの形状の集合として表現する、という考え方である。これには、テンプレートの表現を仮定するものと特徴に基づいた表現を仮定するものの両方を含んでいる(Bülthoff & Edelman, 1992; Humphrey & Khan, 1992; Tarr & Bülthoff, 1995; Tarr, 1995; Ullman, 1996)。それに対して、Marr が主張したような、視点変化に影響されない物体の三次元構造を立体的にモデル化した表現が存在する、という考え方がある(Biederman, 1987; Corballis, 1988; Hummel & Biederman,

1992; Marr & Nishihara, 1978)。Marr は、明るさの変化のみを記述した原始スケッチから、観察者に対する面の方位に関する情報が加えられた 2.5D スケッチを経て、視点に不変な物体中心に記述された 3D モデルが求められると考えた。

このような Marr の主張は、二次元形状から三次元構造を再構成していくことが、認識の根幹であり、その過程を実現するアルゴリズムが最も重要であるという研究の流れへと繋がっていった。しかし、現実には考案されたアルゴリズムのほとんどは、その適用範囲が限定されたものであり、実際に人間がどのような表現を脳内に保持しているのかとは無関係なものであった。

このように、人間にとってこれほど容易で時間を要しない課題であっても、人工的に実現することは大変困難である。このことは、脳における基本的な構成原理を考える上で、1 つの有効な視座を与えている(Ullman, 1992)。

1.3 本研究における基本的立場

人間の視覚的物体認識は、日常的には視点変化に対して安定しており、視点不変性は自明の事として、普段はあまり意識されない。しかし、多くの心理学的研究は、少なくともある状況下では、人間の物体認識が視点に依存していることを明らかにしてきた。視覚的物体認識メカニズムの解明における最大の課題は、この両端に位置しているように一見思われる処理様式の違い（視点不変型 - 視点依存型）を、統一した枠組により説明していくことにある。

こうした枠組みの 1 つとして、視点に依存した処理を行うモジュール(=テンプレートの表現)を基盤として、複数のモジュールがそれぞれの視点を担当することで、全体として視点変化に不変な認識を実現しているというものがある(Tarr & Pinker, 1989)。しかし、こうした view-based モデルは、人間の認識を必ずしもうまく説明できるものではない。特に、十分なテンプレート数があらかじめ必要となるために、柔軟性に欠けている(Tarr & Bülthoff, 1998)。

人間の認識は、非常に柔軟であり、かつ効率的に行われている。単に二次元画像から三次元モデルを計算するだけならば、数多くのアルゴリズムが存在しうる。この時、異なるアルゴリズムの評価基準は、適用範囲が広く(柔軟性)、計算の負荷が少ない(効率性)といった点になるであろう。これらの点を明らかにする上で、人間がこの問題をどのように解いているかを明らかにしていく実験的手法は、非常に有効であると考えられる。

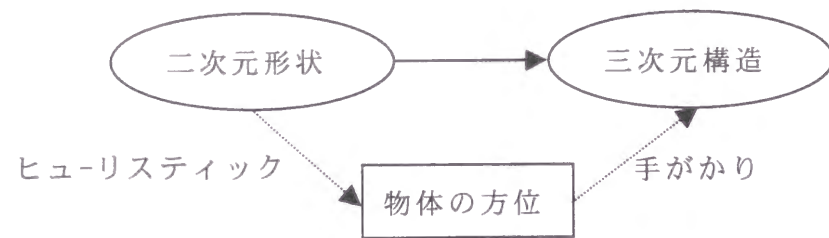


図 1.2: 本研究における基本的立場。二次元形状から得ることができる物体の方位に関する情報を与える視覚特性は、物体の三次元構造に関する大きな手がかりとなっている。

図 1.2 に、本研究における基本的立場を図示した。二次元形状から三次元構造を直接に再構成するためのアルゴリズムは多くの場合複雑であり、常に頑健な安定した結果が得られるかという点でも疑問を呈さざるを得ない。こうした考え方に対して、本研究では、人間が物体の二次元形状に含まれている特徴から、物体がどのような方位にあるかに関する判断を行うことで、三次元構造に関する推定を行っているという前提をおいた。こうしたヒューリスティックの利用は、すべての状況においてうまく働くことを保証するものではない。しかし、人間が積極的にこうした方略を用いることで、頑健で効率的に認識を行っていると考えすることは決して不自然ではない。

図 1.2 のような考え方にしたがうと、人間は知覚された形状において、物体が何であるかを示すような幾何学的構造に起因する物体固有の形状の違いと、物体が三次元的にどのような向きにあるかによって変化するような形状の違いとを、それぞれ別々に処理している必要がある。つまり、視点不変な形状知覚を行うことは、知覚形状を生成した形状と方位という2つの独立な要因を推定していくプロセスであると考えることができる。

こうした2つの要因が記憶内で独立に表現されていることは、認識における安定性と感度(Marr & Nishihara, 1978)を保つためにも重要である。視覚的物体認識が、知覚形状と記憶されている物体表現との照合によって達成されると仮定すると、2つの形状がどの程度似ているかという類似度が物体の記述に反映されていなければならない。さらにその一方で、異なる形状を識別するために、形状間の微細な違いも表現されていなければならない。そのためには、あまり変化しないような安定した情報と他の形状との識別において有効な情報とが分

離されていることが望ましい。このような物体を同定するために必要とされる形に関する情報を形状・同定情報と呼ぶ。それに対して、物体を三次元空間内で変換するために必要とされる観察者に対する物体の方位に関する情報を方位・変換情報と呼ぶ。表現がどのように視点変化に対して安定して、同時に微細な形状変化に感度を保つことができるのかを明らかにするためには、この形状・同定情報と方位・変換情報を人間がどのように知覚し、どのように表現しているかを明らかにしなければならない。

つまり、物体の見かけの形状変化が、これら2つの要因が混合したものとなっているために、視点不変性を達成するためには2つが独立に知覚される必要がある。本研究の第2章では、この点を心理物理学的手法(類似性判断課題)により明らかにした。さらに、第3章と第4章では、形状・同定情報の符号化が、方位・変換情報によってどのように影響されるかを再認記憶課題により明らかにした。このことから、方位・変換情報が単に独立に知覚されるだけでなく、効率的な認識を達成するために積極的な役割を果たしていることを示した。第5章ではfMRIを用いた刺激実験を行い、実際に脳内でどのようなモジュールが視点不変な認識に関与しているのかを検討した。

1.4 形状・同定情報と方位・変換情報の処理の独立性

まず始めに、形状がどう定義されるかを考える。物体の遮蔽輪郭から得られる形状情報は、認識を行うために最も有効な視覚特性である。なぜならば、他の視覚特性(色など)と比べて、物体についての特性に関する予測が最も容易になるからである。例えば、「リンゴ」の形状からは、リンゴについての様々な特性を予測することができる。しかし、「リンゴ」の色のみからは(すなわち、対象物の形は分からないが、色が赤いということのみが分かっている場合)ほとんどリンゴについて何も分からない状態のままである。

Palmer は、形状を「空間的変換に対して変化しない物体の空間構造(Palmer, 1989)」と定義した。このように形状を定義した時、形状は物体の変換に対する不変な特性を反映している。図 1.4 に様々な変換に対する二次元図形の見えの変化を示す。明らかに見えとしてはそれぞれ異なっているものの、同じ形状であることと即座に判断することができる。

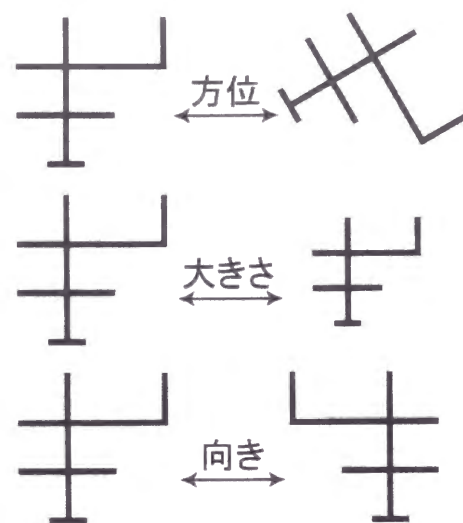


図 1.3: 変換に対する見えの変化 (Palmer, 1989 に基づいて作成)

それに対して, Hummel と Stankiewicz は, 人間の形状識別に関する能力が, 変換による形状の変化が単に計量的な変化 (例えば, 線分の長さ) であるか, それともカテゴリーカルな変化 (例えば, 線分同士の位置関係) であるかによって異なることを明らかにした (Hummel & Stankiewicz, 1996). つまり, 同じ形状の変化であっても, その変化が質的であるか, それとも量的に過ぎないものであるのかによって知覚が異なっていることになる. このことは, 物体の形状表現が単にテンプレート的なものではないことを示している.

つまり, 形状そのものではなく, どのような要因が形状を変化させているかが認識に対してより強く影響している. このように, 「知覚した形状が何であるか」ではなく, 「どのようにして知覚した形状が生成されたか」を考えていくことが, 視点不変性を明らかにする上で重要となる. 本研究では扱わないが, こうした枠組みは, より広範囲の物体認知に関わる現象を説明する為にも必要である. 例えば, 道端にあるつぶれた空き缶をみている状況を考える (Leyton, 1999). つぶれた空き缶の形状そのものは, 空き缶について人間が保持しているプロトタイプ的な形状と大きく異なっている. それにも関わらず, 人間はその形状から「つぶす」という動作がはたらきかけられたことを, 容易に推測することができる. さらに, 「つぶす」というその物体の過去に関する推測から, その空き缶が元々どのような形状をしていたかに関する推測も同時に可能である. Leyton は特に非対称性のような規則性から逸脱している形状は, 外部要因の働きかけがあったことを示唆していると主張した (Leyton, 1992).

認識との関わりにおける形状情報のもう 1 つの重要な特性として, 典型性が挙げられる. 心理学的研究から, 物体のある特定の見え方 (view) が他の見え方と比較して, 認識の成績が優れていることが明らかにされている (Palmer, Rosch & Chase, 1981). こうした物体の最も「よい」, または物体の代表的な見え方は典型的景観 (canonical view) と呼ばれている. Palmer らは, 日常的に見慣れた三次元物体を様々な方向から撮った写真を用いて, 多くの物体の典型的景観が, 斜め上方向からの見え方に対応していることを明らかにした. 典型的景観は, ほぼ被験者の間で一致が見られ, 一般的に人間が典型的景観からの見え方を最もよい見え方として捉えていることが示された. 最もよく見る方向からの見え方を, 物体の代表的な表現として持っているということは生態学的にも妥当である. さらに, こうした典型的景観が, どのような要因により形成されるのかという研究が数多く行われてきた (Cutzu & Edelman, 1994; Tarr & Pinker, 1989).

こうした典型的景観に関する知見を踏まえて, Turnbull は 2 名の異なる症状を示す脳損傷患者に対して神経心理学的実験を行った. そして, 形状 - 同定情報に関する処理と方位 - 変換情報に関する処理とが二重解離していることを明らかにした (Turnbull, 1997; Turnbull, Beschin & Della Sala, 1997; Turnbull, Laws & McCarthy, 1995). Turnbull は, 視覚失認の症状を示す患者 DM (視力などの基本的な視覚能力は正常であるにも関わらず, 物体認識能力が低い) と, 視空間能力が著しく低い患者 LG の 2 名に対して, 日常的によく見慣れた物体の線画を用いた 2 種類の課題を行わせた. 1 つは, その線画の名前を 4 つの異なる方位から答える名前呼称課題であった. 名前呼称課題において失認患者 DM の成績は非常に低かったのに対して, 視空間能力障害の患者 LG の成績は, 年齢が等しい統制群と差が見られなかった. それに対して, カードに描かれた物体の線画を, 日常的によく見るような方位に合わせるという課題では, 全く逆のパターンが見られた. DM は, 物体線画の呼称課題はほとんどできなかったにも関わらず, その物体の典型的方位を示すことはほとんどの場合可能であった. つまり, その物体が何であるかを理解していないにも関わらず, その物体が「傾いている」かどうかに関する判断が可能であったことを示していた. このように, DM と LG の成績の間に二重解離が見られたことは, 形状 - 同定情報と方位 - 変換情報との処理が脳内で独立であることを示唆している.

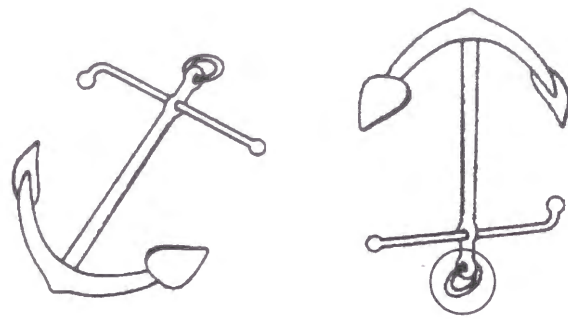


図 1.4: 視覚失認患者(DM)が報告した誤った典型的方位の例(Turnbull, 1997 より一部改変). 円内の部分が,「車輪」とであると知覚されたために,右の方位が典型的な方位であると誤って報告した.

さらに, DM が誤って典型的方位であると報告した例を検討することから, DM がどのような方略をとることによって, 典型的方位の判断を行っていたかが明らかになる. 図 1.4 右に示した線画は, DM が「いかり」について典型的方位であると報告したものである. 通常は, まず線画が「いかり」を表しているものであることが, 意味的知識に基づいて判断される. その後, 図 1.4 左に示したように, 「いかり」という物体が日常的にどういう方位で観察されるかという経験的事実に基づいて, 典型的方位についての判断がなされると考えられる. それに対して, DM の内省報告から, DM が意味的知識を経由しない処理によって, 典型的方位に関する判断を行っていることが明らかにされた. DM は次のような方略を用いることで, 典型的方位に関する判断を行ったことを報告した. まず, DM はこの物体が「車輪が1つからなる物体」とであると答えた. 次に, 「車輪」が一般の物体に関しては下部にくることが多いために, 図 1.4 右に示したような方位が典型的方位であると判断したと報告した. 多くの場合, こうした方略が適切に機能することにより, 物体の形状・同定情報が得られていない場合であっても, 結果として典型的方位を示すことが可能であったと考えられる. このように, 知覚された物体の構造を一般的な構造的知識と照らし合わせることで, どのような方位が典型的であるかを判断する処理過程が, 物体の同定過程とは脳内で独立して存在していることが示された.

1.3 節で述べたように, 視点不変性を達成するためには, 形状・同定情報と方位・変換情報が独立に知覚される必要がある. DM がとった典型的方位判断の方略は, 方位・変換情報を意味的知識とは独立して物体の二次元形状から知覚する処理過程について, 重要な示唆を与えている. 意味的知識に基づいた

方位判断は, その物体を最も高い頻度で観察する方位が典型的であると判断しており, 特定の物体に対する親近度(familiarity)を反映している. それに対して, DM の方略は, 意味的知識とは独立した形態的(構造的)知識に基づいた方位処理過程が存在していることを示している(名前呼称課題における, 意味的表現と独立した構造記述システムについては Humphreys, Price & Riddoch, 1999 を参照).

このように, 形状・同定情報から独立した方位・変換情報の表現を考えるためには, 意味的知識とは独立した構造記述システムの性質を明らかにしていくことが必要となる(図 1.5).

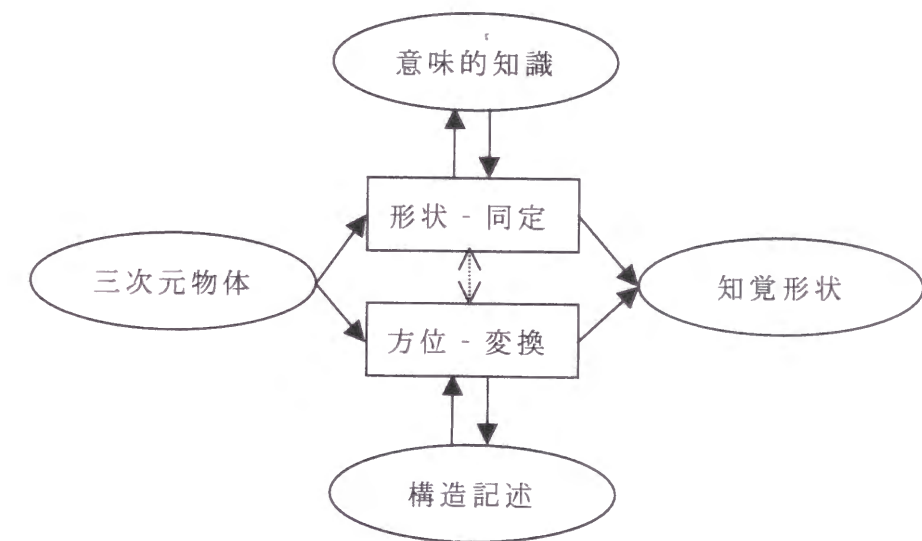


図 1.5: 形状・同定情報と方位・変換情報の独立性

1.5 幾何学的構造による方位・変換情報の推定

人間は線分やエッジのように単純な幾何学的な要素であっても, その方位を知覚することができる. 一般に, 線分が重力方向と一致している場合, 線分は垂直であると知覚される. それに対して, 重力方向と直交している場合, 線分は水平であると知覚される. この経験的事実は, 環境内のあらゆる場所で重力の影響は歴然としていることから当然導かれるべきものである. しかし, 頭部の傾きを考慮すると, 重力方向と網膜像における上下方向は必ずしも一致しない(Rock & Heimer, 1957).

Rock は, この問題を視覚系が網膜像を2つの異なる水準に基づいて符号化し

ていると考えることにより説明した(Rock, 1973; 1974)。1つは、網膜座標に基づいた記述であり、網膜要因(retinal factor)と呼ばれる。もう1つは、現象的な見えに基づいた記述であり、方向割当要因(assignment-of-direction factor)と呼ばれる。後者は、形状に対してどのような知覚的枠組を設定するかによって決定される。知覚された形状の方位は、これら2つの要因間の相互作用によって決定されると考えられる。両要因が一致した符号化が行われる場合は、形状は正立であると知覚される。それに対して、両要因が異なる符号化を行う場合、形状が傾いていると知覚される。網膜要因は、網膜像における上下左右であることから、方向割当要因がどう定められるかが形状の方位知覚に決定的役割を果たしていることになる。この時、網膜像と独立に上下方向を割り当てるためには、形状の特定の部分的特徴が、どの程度の確率で形状の特定の位置にくるかに関する事前知識が予め保持されている必要がある。Turnbullにより報告されたDMの典型的方位を判断するための方略は、人間がこうした部分の形状全体における位置に関する事前確率分布を、形状が何であるかに関する知識とは別に保持していることを示唆している。

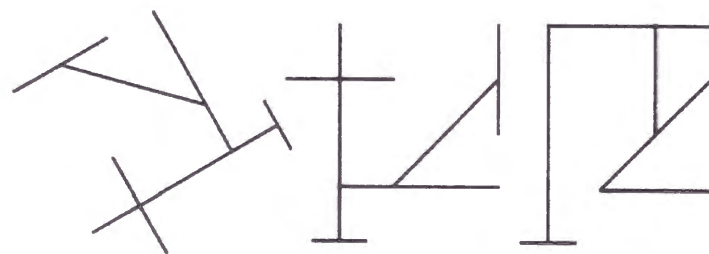


図 1.6: 第2章および第3章における心理実験で用いられた無意味図形の例。線図形はすべて脚部を持った主軸となる線分とその他4つの線分から構成された。このために、図形の違いはすべて特徴同士の異なる空間関係による構造の違いによって考えることができる。

図 1.6 は、第2章と第3章における心理実験で用いられた無意味図形の例である。意味的知識から独立した構造記述システムの特性を調べるために、このように特定の意味を持たないような線図形が心理実験では用いられた。さらに、幾何学的構造のみを実験的に操作することができるように、すべての線図形を同じ特徴線分の集合から作成した。図中左の線図形は中央の線図形に対して方

位が異なっているのに対して、右の線図形は中央の線図形に対して形状が異なっている。日常的なシーンにおいて見られる物体の多くが三次元であることから、こうした二次元の線図形を実験において用いることの意義をあらかじめ議論しておく必要がある。

第一に、多くの研究は、物体が三次元であること、つまり奥行きをもっていることにより視点不変性の問題が生じると想定している。しかし、観察者が固定されて物体が自発的にその姿勢を変化させることは、現実にはあまり起こりうる事態ではない。むしろ、現実環境内で移動する事が多いのは観察者の側であり、その移動は三次元的に捉えることができる。このため、認識対象の物体が二次元であっても、その知覚形状の変化は三次元として捉えられる必要がある。

第二に、三次元物体を実験的に扱う場合の問題点として、自己遮蔽による可視状態にある特徴の変化が挙げられる。物体を同定するために必要なすべての特徴が可視状態にない場合であっても、どのようにして頑健な認識を行うことができるかは重要な問題ではある。しかし、意味的知識から独立した構造記述に基づいた認識を考えていく上では、すべての特徴が可視状態にあり、特徴間の空間関係が十分に顕著であるような物体を実験で用いる方がより適している。図に示したような線図形は、この点を満たしている。

最後に、人間の認識システムが、物体が二次元図形であるかより一般的な三次元物体であるかによって、それぞれに特化しているとは考えにくい。むしろ、共通した処理機構が存在しており、二次元図形は三次元物体一般の認識に関わる処理過程の基礎を担っていると考える方が自然である。

このように、二次元の共通した特徴から構成される無意味図形を用いることで、視覚的物体認識における意味的知識から独立した構造記述システムの特性と機能を明らかにすることができる。図 1.6 に示した線図形がもつ構造的性質としては、次の2点が挙げられる(Turnbull, Beschin & Della Sala, 1997)。1つは、図形の主軸の存在である。図形の記述の基点となる特徴が、どのような方位にあるかは、図形全体の構造を規定する重要な要因である。もう1つは、図形の境界領域における不規則な特徴である。Turnbullらは、人間が方位判断を行うときに、不規則な特徴が垂直方向で上にくるように形状の方位を決定していることを報告した。つまり、物体が安定した基底を持つように、その方位を決定するようなバイアスが働いている。心理実験で用いた線図形においては、主軸

に対する脚部（短い線分）が安定した基底に対応している。これら2つの構造的性質から、線図形に対して典型的方位を判断することが可能になると考えられる。

1.6 方位 - 変換情報の認識に対する役割

1.3 節で述べたように、知覚された形状の特性で、物体の方位に関する情報を示すものがある場合、効率的な物体の三次元構造の推定に役立つと考えられる。つまり、1.4 と 1.5 節で述べてきたように、形状 - 同定情報と方位 - 変換情報とを独立に知覚することは、単に視点不変な認識を達成するためだけではない。むしろ、効率的な認識を行うために、方位 - 変換情報は積極的な役割を果たしていると考えられる。方位 - 変換情報の認識に対する役割として、主に次の3つが挙げられる。

1 つは、新奇な物体に対する認識である。経験したことがないような物体であっても、少なくともその構造的情報からその物体に対して目的の動作を行うことが可能である。このとき、動作を行うために適した表現が呼び出されることにより、動作に関連した物体の意味的知識（物体がどのような機能をもっているかなど）が呼び出され、認識が可能となっていると考えられる。

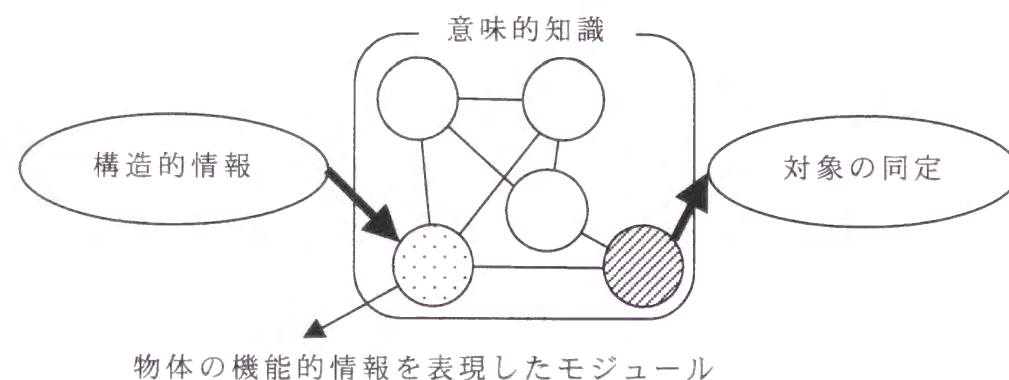


図 1.7: 構造的情報からの認識に関する図式

このような図式においては、視覚的物体認識を「見ている物体が何であるかが分かること」ではなく、「見ている物体が特定の動作を行うために適しているかを判断すること」とみなしている(Rivlin et al., 1995)。つまり、ある目的に沿って動作を行うために認識を行うことが必要な状況では、目の前にある物体に

対して、その動作を行うことができるか、またはその動作が新奇な物体からアフォードされるかが重要となる。

次に、方位 - 変換情報を事前に知覚することで、記憶からの物体モデルの探索を効率的に行うことができることが挙げられる。Ullman は、異なる景観からの視覚的物体認識を探索問題として計算論的に定式化した(アラインメント法; Ullman, 1989)。まず、観察された物体に対して、すべての保持されている物体モデルのすべての景観から、最もよい照合が得られる景観が探索される。 V を観察物体、 M を記憶内に保持されている異なる物体モデルから構成される集合とする。そして、 T をモデルに対して適用可能な変換から構成される集合とするとき、認識は、観察物体とモデルとの照合を最大化するように M と T を計算することとして定式化される。この時、探索空間の次元が膨大なものになるために、探索を二段階に分けて行うが必要になる。まず最初に、観察物体とすべての物体モデルとの間の変換が決定される(アラインメント段階)。その後、最もよい照合が得られる物体モデルが選択される。この段階では、探索は物体モデルの集合に対してのみ行うことになる。つまり、先に変換が一意に決定されることにより、探索空間が大幅に縮小される。可能な変換の集合は、観察方向の変換について考えると、剛性運動(三次元空間内での平行移動と回転)の 6 つのパラメータによって記述することができる。このため、観察方向の変換を決定することは相対的に容易であると考えられる(詳細は Ullman, 1989)。

最後に、部分から方位を決定するための構造的情報と典型的方位との関係を考える必要がある。Leek(1998)は、日常的に様々な方位において存在している物体(多方位物体)と、ある特定の方位においてのみ存在している物体(単方位物体)との2種類を用いて、認識の方位依存性を調べた。その結果、多方位物体は、認識成績は方位の変化に関わらず、ほぼ一定であった。このことは、物体の部分が日常的に特定の方位において知覚されることが、典型的方位と関係していることを示唆している。

1.7 論文の構成

本論文では、心理学的手法と神経機能画像法と呼ばれる手法を用いて、視覚的物体認識に関わる脳内メカニズムの解明を行った。図 1.8 に本論文における各章の流れを示す。本研究において用いられた2つの異なる手法から得られた

知見は、互いに補うことにより、物体認識に関わるメカニズムを全体として明らかにすることができる(Marr, 1982).

心理学的研究は、課題に関与している表現の性質や課題を達成するために人間が用いているアルゴリズムの問題を扱っている。本研究では、第2章から第4章および第5章の一部において心理学的手法を用いた。それに対して、神経科学的研究は特定の認知機能が脳というハードウェアにおいてどのように実装されているかを明らかにすることを目的としている。具体的には、どのような活動を示すニューロンが関与しているかという問題や、脳におけるどの領域が特定の認知機能に関わっているかという問題である。本論文では、第5章で視点からの物体景観の典型性の違いが処理に与える影響を非侵襲的な脳活動の計測手法の1つであるfMRIを用いて検討した。最後に、第6章において心理学および神経機能画像法研究からの知見に基づいて、視点変化に対して頑健性を保つような認識メカニズムにおいて必要な計算目標を提案した。

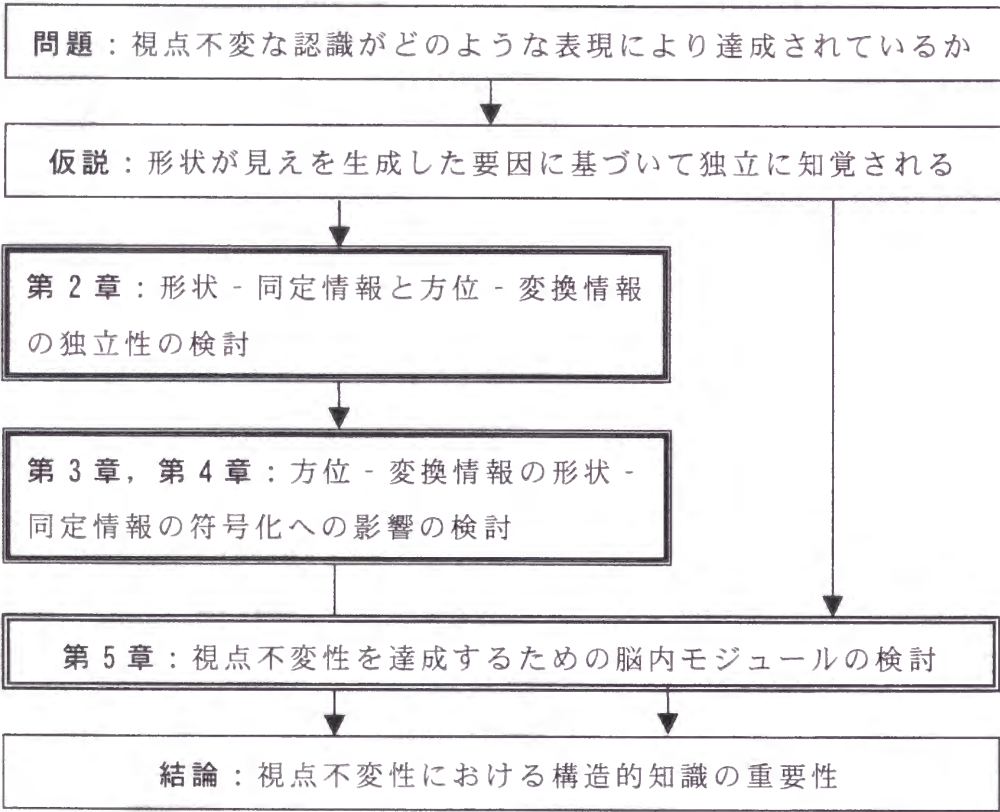


図 1.8: 本論文における各章の流れ

第2章 形状 - 同定情報と方位 - 変換情報の独立性

2.1 はじめに

多くの先行研究は、物体の方位や大きさなどの空間特性に、認識が影響されることを明らかにしてきた(Rock, 1973; Tarr, 1995). 物体の姿勢による空間特性と物体固有の幾何学的構造は、物体の見えを規定している2つの代表的な要因である。見えの変化はこれら2つの要因が混合したものであることから、視点に影響されずに物体固有の幾何学的構造を知覚するためには、両要因が独立に知覚される必要がある。

両要因が脳内で独立して表現されていることを示す証拠は、いくつか挙げることができる。まず、人間の認知的機能の多くは、いくつかの下位モジュールから構成されていることが知られている。特に、認知心理学的な記憶研究は、記憶システムがその内容に依存して複数存在していることを明らかにしてきた(McKoon, Ratcliff & Dell, 1986).

例えば「物体を把持する」といった動作を適切に行うために必要な情報は、手続き記憶内に保持されている。手続き記憶においては、動作を行うために、物体がどのような向きにあるのが最も適しているかが表現されている。こうした動作に関連した情報は、単に見ている物体が何であるかを理解するためには、必ずしも必要ではない。しかし、「何かを使って、叩くという動作を行いたい」といった特定の目的のために認識を行う状況においては、物体が何であるかに関する情報よりも有効である。例えば、物体がどのような三次元構造を持っており、方位の変化によってどのような見えの変化をもたらすかに関する情報の方がより役に立つ。こうした記憶システムの多重性は、物体の形状-同定情報と方位-変換情報とが独立に表現されている可能性を示唆している(図 2.1).

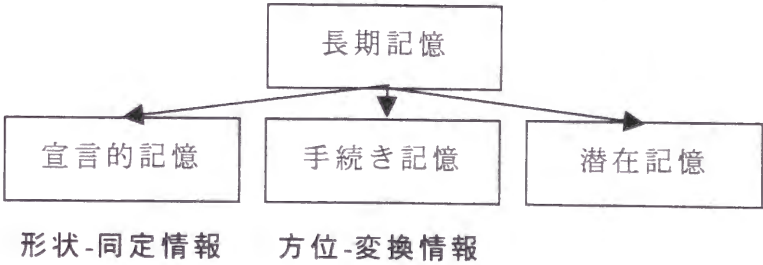


図 2.1: 長期記憶の下位システム

さらに、脳内の異なる領野で異なる空間コードが用いられている可能性が、神経生理学的研究により明らかにされてきた。例えば、TE 野と呼ばれる下側頭皮質(IT)の前部にあたる領野では、ある程度の複雑さを持った物体の形状を構成する部分的形状に対して選択的に反応するニューロンが、コラム状に配置されていることが知られている(Tanaka, 1996)。こうしたコラムは、物体の形状表現の基盤になっていると考えられている。それに対して、後部頭頂皮質腹側部に対応している VIP 野と呼ばれる領野においては、頭部を中心とした座標系に基づいた空間位置の符号化がなされていることが分かっている(Colby et al., 1993)。つまり、脳内の異なる領野で、物体を中心とした空間コード(形状-同定情報)と観察者を中心とした空間コード(方位-変換情報)とが別々に表現されている可能性を示している。

こうした神経生理学的研究から、Ungerleider と Mishkin は、大脳皮質における視覚処理経路の腹側系（一次視覚野から下側頭皮質）と背側系（一次視覚野から後部頭頂皮質）が機能的に分離していると主張した(Ungerleider & Mishkin, 1982)。具体的には、前者が物体認識、後者は空間内での位置の処理を行っていると述べた。物体認識を行うためには、観察者の位置や方向に依存しない記憶表現を活性化させることが重要であるため、腹側系に存在する広い受容野特性を持ったニューロンが適している。それに対して、頭部を中心とした空間位置の表現は、物体に対する動作を行うために適した表現となっている(Milner & Goodale, 1995)。

脳内での異なる空間情報の符号化に関する証拠は、神経心理学的研究からも得られている。Humphreys と Riddoch が報告した半側空間無視患者は、課題によって無視の仕方が異なっていた(Humphreys & Riddoch, 1994)。例えば図 2.2 のように、画面内のランダムな位置に単語と非単語が複数個提示され、患者は、それぞれの単語を読むように求められた。このとき、患者は画面の右側の単語や非単語ははじめから無視することが多かったのに対して（下線部）、読みの間違いは画面全体でみられた（下の括弧内）。線画に対する命名課題や、線分分割課題においても同様の傾向が見られた。Humphreys と Riddoch はこれを個々の物体に対しては左側の無視も生じるのに対して、複数の物体を処理する場合は右側の無視が生じるためであると考えた。さらに彼らは、このような二通りの異なった無視の現われ方は、右に関しては両側の前頭頭頂領野、そして左に関

しては両側の後頭頭頂領野の損傷が見られたことと関係していると主張した。つまり、単語の読み課題においては、部分を全体に対して記述する空間符号化が用いられている。それに対して、刺激の画面内での検出においては部分をそれぞれ全体とは独立に記述する空間符号化が用いられており、それぞれ別々の脳内領野で処理されていることを示唆している。

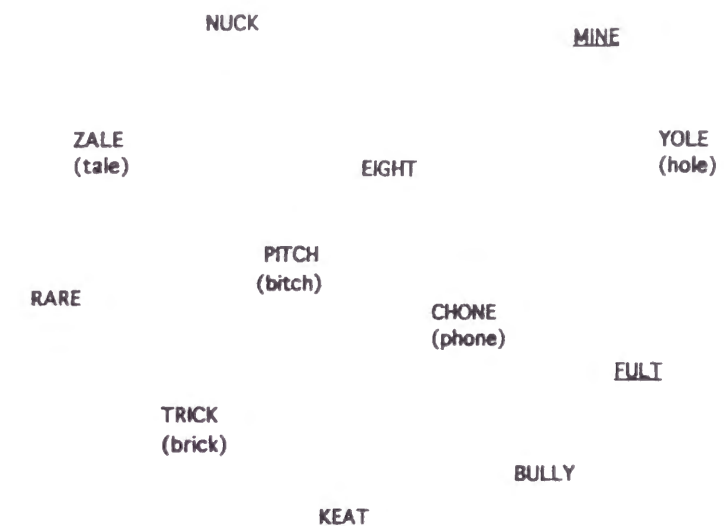


図 2.2: 複数の単語と非単語の表示画面例。Humphreys & Riddoch (1994)より引用。下線が引いてあるものが無視されたもの、下の括弧内に別の単語が書かれているものが読み間違いがあったもの。

このように、認知心理学的、神経生理学的、神経心理学的知見から、形状-同定情報と方位-変換情報とが、脳内で別々に表現されていることが示唆される。本章では、心理実験により形状知覚における 2つの情報の独立性を明らかにした。こうした独立性により、ある物体の 1つの景観しか学習していない場合であっても視点不変な認識が達成可能となる。このことは、人間の視覚的物体認識能力の柔軟性を考える上で重要である(Hummel, 1994; Biederman & Gerhardstein, 1993; Biederman et al., 1999)。こうした問題点に対して、view-based モデルは理論的拡張を行うことで、説明を試みてきた(Tarr & Gauthier, 1998; Perrett, Oram & Ashbridge, 1998)。しかし、線形補間アプローチにおいては、異なる景観が景観空間内で滑らかに変化するということが前提となっている。こうした前提の下では、景観の形状の違いが計量的な場合には、ほぼ自動的に般化と識別が可能となる。しかし、依然としてカテゴリー的情報が異なる場合に、

どのような表現が必要であるかを説明できない。さらに、重要な点として、仮定されている滑らかに変化する景観空間が、どのようにして獲得されるのか、そして景観空間がどのような情報を符号化しているかが明らかにされていない。

2.2 心理実験

2.2.1 目的

本実験は、実験的に求められた被験者の類似性空間において、形状-同定情報と方位-変換情報が独立に知覚されていることを示すことを目的とする。さらに、それぞれの情報が形状のどのような特性に対応しているかを、導出された空間の特徴次元の意味から検討した。

2.2.2 方法

第2章から第4章までの心理実験においては、すべて図2.3に示したような二次元的な意味を持たないような幾何学的図形を用いていた。

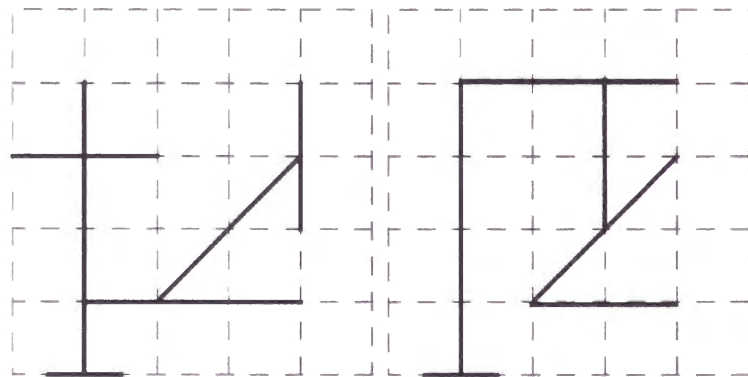


図 2.3: 第2章と第3章における心理実験で用いられた刺激図形例

二次元図形を用いることの利点として、奥行き方向を含んだすべての変換に対して見え方の性質(アスペクト)が変化しないことが挙げられる。さらに、同じ特徴から構成された図形を用いることで、特定の弁別的特徴に基づいた認識ではなく、幾何学的構造全体の影響を検討することが可能となる。

実験では被験者に対して、それぞれ異なる情報が変化している3つの刺激図

形集合に対して、それぞれに類似性判断を行わせ、多変量解析の手法の1つである多次元尺度構成法(multi-dimensional scaling method, MDS)により内部表現を復元した。さらに、正準相関分析により条件間で内部表現を比較することによって、被験者が形状-同定情報と方位-変換情報とをそれぞれ独立の次元として知覚していることを明らかにした。実験条件としては、次の3つが設定された。それぞれ、特徴の空間配置が異なる条件(形状変動条件, SV), 図形の平面と奥行き変換のパラメータが異なる条件(変換変動条件, TV), そして両方とも異なる条件(形状-変換変動条件 SVTV)であった(図2.4)。

図2.3および2.4で示した刺激図形はTarrとPinker(1989)が用いたものに基づいて作成された。すべての刺激は共通した5つの線分特徴から作成されており、刺激の最も長い垂直軸に対して「足」になるような水平線分が加えられた。これらの特徴を「足」のついた主軸だけが必ず垂直方向と一致するようにして、他の4つの線分特徴を90度単位でのランダムな方位と位置に配置することによりそれぞれの図形を作成した。このとき、すべての線分特徴は結合しており、かつ閉じた部分が作成されないようにした。これは、刺激内に弁別的特徴が生じないようにするためであった。こうした手続きによって、特徴の異なる空間的配置によってそれぞれ異なる図形を作成することができた(約1000個)。これは、変換変動条件において毎判断試行に異なる図形を提示するために必要であった。

各条件において、知覚された図形が類似性を表現した空間内の1点として表現されるならば、形状-同定情報と方位-変換情報とが異なる図形間の類似性は、被験者の表現空間がどのように構成されているかを反映していると考えられる(Edelman, 1995)。一般に、形状は輪郭や局所的特徴などに対応しているいくつかの心理的次元によって特徴付けることができる。これらの心理的次元は外部世界の物理的特徴の関数になっていると仮定される。したがって、被験者が主観的に判断した類似性に基づいて復元された心理的次元は、どのような形状の特性の変化が知覚されていたかを示している。

さらに、表現空間として類似性空間を仮定することは、次のような意味を持つ。1つは、類似性が単に特徴次元によって張られる心理的空間内での距離ではなく、それぞれの特徴次元でどの程度の変化が許容されるかを反映している。例えば、同じカテゴリーであっても「リンゴ」というカテゴリーに属している物体が互いに似ている程度はほぼ等しいことが多いのに対して、「イス」などの多くの人工物に属している物体間の類似性は、大きくばらついている。つまり、

「リング」であると認識する場合と比較して、「イス」であると認識する場合の方が、より広範囲における形状の変化を許容する必要がある。このことから、あらかじめそれぞれの物体カテゴリーについて、どの程度形状が変化しているかに関する知識が獲得されていなければならない。

多くの類似性判断課題においては、どのような刺激が提示されるかや、どのような教示が与えられているかによって被験者の判断が影響されることが知られている。このため、被験者にはどのような刺激集合が提示されるか、さらに事前に「類似性」という概念に対する明確な定義は与えられなかった。当然、被験者は各実験条件において判断を何度も行っていくにつれて、刺激集合の特性に関して何らかの推測を行うことが予想される。その結果、刺激のどのような特性に対して注意を向けるか、およびどのような判断方略をとるかについては個人差が生じると考えられる。こうした個人差を考慮した上で、実験条件ごとの内部表現を復元するために、複数の被験者の類似性判断データがプールされ、重みつき MDS の手法の 1 つである INDSCAL モデルにより分析された(Dillon & Goldstein, 1984)。導出された各次元ごとの重みを見ることによって、被験者がどのような形状次元に対してどの程度注意を向けていたかを、明らかにすることができる。

さらに、被験者の判断方略を統制するために、類似性判断の手続きとして、4 点法(method of tetrads)が用いられた。2 組の刺激対（つまり画面上では 4 つの刺激）が注視点に対して左右に短い時間(1000 ms)提示され、被験者はどちらの刺激対がより互いに類似した刺激対であるかを答えた。このような手法を用いることにより、被験者は二値判断だけを行えばよいことになり、刺激対間でどの程度類似性が高かったという定量的な判断に関わる方略を除くことが可能になる。さらに、提示時間を短くすることにより、判断に対する知覚内容以外の影響を最小限にした(Klein, 1982; Leibowitz & Bourne, 1956)。各刺激対は、どの程度他の刺激対に対してより類似性が高いと判断されたかにしたがって順位づけがなされ、順位データ行列を近接性行列へと変換することで MDS により分析がなされた。

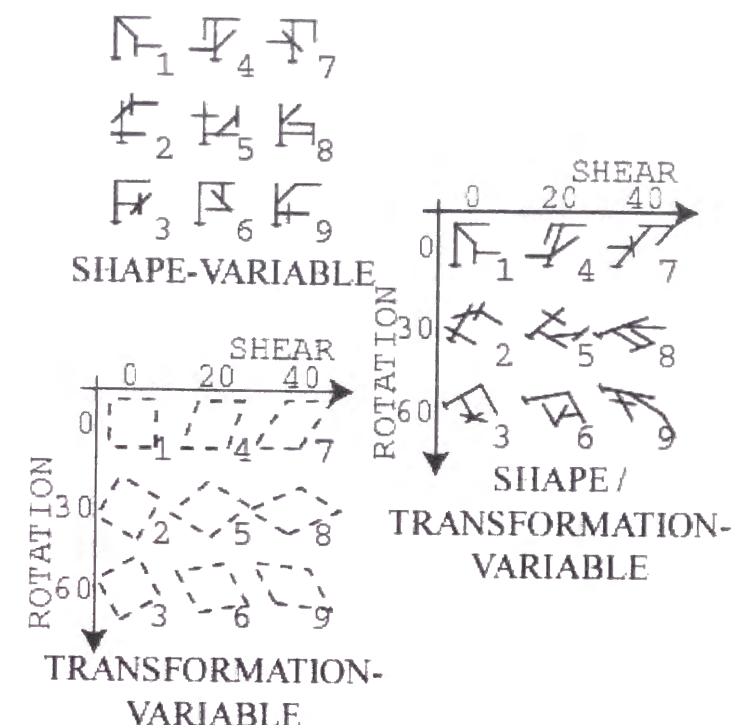


図 2.4: 実験における条件ごとの刺激図形集合。SV と SVTV 条件においては共に図に示したような 9 種類の線図形が用いられた。TV 条件においては、9 通りの変換の組み合わせに対して、毎試行異なる図形が、あらかじめ作成された刺激図形の集合(約 1000)から選択された。つまり、各類似性判断試行で提示される 4 つの図形は毎回すべて異なっていた。

刺激図形に対しては、2 種類の変換が適用された。1 つは、画像平面上での回転変換(角度 θ)であり、もう 1 つは水平方向に対する剪断変換(角度 ϕ)であった。それぞれの変換は、次のように表すことができる。

$$\text{rotation } \mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

$$\text{shear } \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 1 & -\tan \phi \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

剪断変換は、画像上では、水平方向に対しての $\tan \phi$ 分の歪みとして現れる。平面上での回転変換と水平方向への剪断変換は、それぞれ二次元変換と三次元変換に対応している。剪断変換は、アファイン変換の特殊な場合であり、二次元的な平面物体に対するアファイン変換は、一意に三次元空間における剛体変換の正射影として捉えることが可能であることが証明されている(Ullman, 1989)。したがって、平面回転と水平剪断を合わせて適用したとき、図形に適用される

変換全体の三次元的成分を、水平剪断が反映していると捉えることができる。

水平剪断を三次元変換として実験において用いた理由として、変換の結果として形状を構成している特徴間のカテゴリー的な空間関係が保たれることが挙げられる。こうした性質を持った奥行き変換を用いることで、アスペクトを変化させない奥行き変換の形状知覚に対する影響を検討することが可能となる。さらに、一般に行列の乗算は可換ではないために、どのような順序で変換を適用するかをあらかじめ考える必要がある。それぞれの変換による形状の変化の特性を保つために、最初に水平剪断、続いて平面回転が適用された。

Cutzu と Edelman(1998)は、本実験と同様に MDS を用いて、三次元物体間の類似性がどのように表現されているかを検討した。彼らは、それぞれの物体を生成している共通した高次元のパラメータ空間があらかじめ定義されており、認識システムの目的は、こうした客観的なパラメータ空間をできるだけ低い次元で忠実に再構成することであると主張した。つまり、弁別的特徴や、特徴に基づいた構造記述などではなく、単にどの程度他の形状に似ているかという基準に基づいて認識がなされていると仮定しており、こうした考え方は画像ベースのアプローチの理論的拡張に過ぎない。彼らの実験においては、刺激物体集合のパラメータ空間における異なる布置を、どの程度忠実に再構成することができるかを検討することが目的であった。

それに対して、本実験では、まず形状-同定情報と方位-変換情報とをそれぞれ単独に変化させた刺激集合（SV、TV）と、両方ともに変化させた刺激集合（SVTV）に対する類似性判断に基づいて、それぞれの刺激集合に対する内部表現を復元した。そして、条件間での内部表現間の類似性を分析することにより、どのような判断次元に基づいて知覚形状を符号化しているかを明らかにすることを目的とした。もし形状 - 同定情報と方位 - 変換情報とが独立な形で表現されているとするならば、両方を変化させた実験条件における刺激布置は、片方だけを変化させた実験条件における刺激布置をその部分空間として含んでいるはずである。このように、2 つの知覚形状の変化をどのような要因に基づいて処理しているかを検討することで、内部表現の基盤となる心理的次元の特性を明らかにした。

被験者

京都大学の大学院生 10 名。

刺激材料

実験において使用した 3 通りの刺激集合は図 2.4 に示した通りであった。すべての線図形は構造的に正立な方位を持っていた（この方位を 0 度とする）。図 2.4 に示されているように、変換は、画像平面上で 30 度刻みで 3 段階、そして水平剪断が 20 度刻みで 3 段階の 9 通りの組み合わせがあった。各刺激図形は高さ 3.4 cm、幅 3.9 cm で、視角 2.3 度×2.6 度であった。各刺激対は互いに水平方向に 14 cm（視角 9.4 度）離れて提示され、各刺激対の 2 つの刺激は垂直方向に 7 cm（視角 4.7 度）離れて提示された。

3 つの実験条件（SV、TV、SVTV）は、次の点において異なっていた。まず SV 条件では、刺激集合は 9 つのすべて正立方位の線図形から構成された。図 2.4 の左上に刺激集合に含まれた 9 つの線図形が示してある。TV 条件では、刺激集合は図 2.4 の左下に示してあるように、9 つの異なる変換の組み合わせパターンから構成され、実験においては毎試行異なる図形が特定の変換の組み合わせが適用されて提示された。各試行において、形状と方位との間の相関を最小にするために、同時に提示された 4 つの図形はすべて異なるものが提示された。SVTV 条件では、SV 条件と同じ 9 つの線図形が用いられたが、それぞれに 9 通りの異なる変換の組み合わせパターンが適用された。

デザイン

すべての被験者が 3 条件すべてに参加した。各条件ともに 630 試行からなり、実験順序は被験者ごとにランダムに決められた。つまり、実験全体での試行数は 1890 試行であった。それぞれの実験条件で提示された刺激集合は、9 項目から構成されており、刺激対の数は 36、四つ組は 36 の刺激対から選ばれた（ $36 \times 35 / 2 = 630$ ）ので、全試行数（つまり、刺激対の対または四つ組）は 630 であった。TV 条件では、各試行で 4 つの線図形が提示され、それぞれの変換の組み合わせの出現頻度が等しかったため、9 つの変換の組み合わせはそれぞれ全 630 試行中すべて異なる図形で 280 回ずつ現れた。

TV 条件においては、明らかに各試行において類似性判断に形状情報が関与すると考えられる。しかし、次の理由から、最終的に形成される表現空間の次元は、形状情報の変化により影響されないと考えられる。同じ変換の組み合わせであっても、毎試行異なる図形が用いられているために、結果として形状-

同定情報に基づいた類似性のばらつきが大きくなるのに対して、方位-変換情報に基づいた類似性のばらつきはほぼ一定となる。このために、方位-変換情報の変化のみを抽出することが可能となると考えられる。

装置および手続き

刺激提示用に CRT モニタ (SANYO 製 CMT-B17M6, 垂直周波数 60 Hz), そして実験制御用にパーソナルコンピュータ (NEC 製 PC-9821Xa10) が用いられた。被験者はディスプレイを約 85 cm の距離から観察し, 被験者とディスプレイとの間の距離を一定に保つために, 箱型の観察装置 (45 cm×43 cm×85 cm) が備え付けられた。ディスプレイは高さ 24 cm, 幅 32 cm で視角にして 16.2 度×21.6 度であった。

類似性判断における実験手続きを図 2.5 に示す。各条件における試行は次のように行われた。まず最初に, 固視点がディスプレイ中央に 1000 ms 間提示された。その後, 固視点を挟んで左右に線図形の対がそれぞれ二組提示された。線図形の対は縦方向に並んで提示された。図形は 1000 ms の間提示され, 被験者は図形が消えた後で右と左の刺激対において, どちらの対がより互いに類似した図形からなる対であったかをあらかじめ割り当てられたキーを押すことにより反応した。反応後, 次の試行が開始された。提示される 2 つの刺激対の順序はランダムに定められた。被験者は 210 試行ごとに 5 分間の休憩をとり, SV, TV, SVTV 条件すべてを被験者ごとにランダムな順序で行った。各条件が始まる前に, 被験者は各条件で可能な限り一定の内的基準に基づいて類似性判断を行うように求められた。

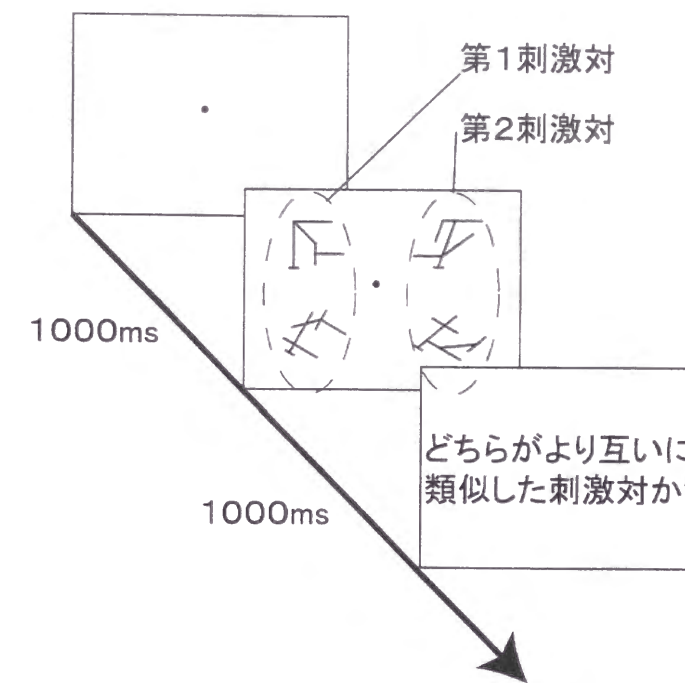


図 2.5: 類似性判断における実験手続き

各実験条件における各被験者の類似性判断データの分析は, 次の手順で行われた。最初に, 9×9 の大きさの刺激集合に含まれる項目間の近接性 (距離) を示す行列を, Cutzu と Edelman(1998)の手順にしたがって作成した。各実験条件において, それぞれの刺激対はすべて 35 回ずつ提示されており, 刺激対は頻度の法則にしたがって, より互いに類似性が高いと判断された回数に基づいて順位付けがなされた。つまり, 他の刺激項目の組み合わせに対してより互いに似ていると判断された回数が多いほど, その刺激対を構成している 2 つの刺激項目は互いに似ているということになる。そして, 刺激対 (i, j) の順位は, 近接性の表において i 行 j 列の要素とされた。2 つの刺激対が同数回より類似性が高いと判断されたとき, 直接 2 つの刺激対を比較した判断試行の反応に基づいて順位が決定された。そして, 被験者間の類似性判断のばらつきを検討するために, 刺激対の順位の一致度をケンドールの一致度係数 (W) を算出して, 統計的に有意であるかが検討された。

次に, 各実験条件ごとに求められた近接性行列は, ALSCAL ルーチン (SPSS Ver 6.1) によって非計量的 MDS にかけられた。10 名の被験者のデータは, 重み付け MDS の 1 つである INDSCAL モデルによりプールされた。INDSCAL モデルでは, 複数の被験者での共通した布置を求めることができると同時に, 個々

の被験者について求められた布置の次元に対する重みも求めることができる。さらに、導出された次元は一意に決定され、回転不可能であるという特性をもっている。本実験においては、このように軸が一意に定められることにより、単に表現空間において近い位置にあるかというだけではなく、どのような次元に基づいて類似性を判断しているかを明らかにすることが可能となる。さらに、各被験者における各次元に対する注意の配分などの特定の方略も、同時に検討することができる。

復元された被験者全体の刺激布置の良さは、クラスカルのストレス-1により評価された。ストレス値とは、モデルに基づいた推定距離と実際の近接性との間の当てはまりの悪さを示す量であり、小さいほど導出された刺激布置がもとのデータ間の類似度関係を忠実に反映している。どの次元解を採択するかに関しては、一般にはストレス値が解の次元数の増加に対して大きく変化する次元解を採択することが多い。このような手法は、次元数をデータ項目数と同数まで採択すればデータを完全に説明することが可能であるが、類似性判断に参与している情報を集約しているとは言えず、各次元の軸の意味が明確に把握しづらい。したがって、本実験では解釈可能な範囲で、3条件でほぼ等しいストレス値をとるような解が採択された。

最後に、実験条件間の刺激布置の比較は、正準相関分析によって行われた。正準相関分析とは、2つの変数集合間の関係を調べるための多変量分析法の1つである。正準相関分析においては、変数集合ごとに、線形結合により正準変量が計算される。そして、正準変量間の積率相関が最大になるように線形結合の係数を求めることにより、変数集合間の関係を検討する。このとき、正準変量間の積率相関は正準相関と呼ばれる。

SV条件単独とTV条件単独のそれぞれで、主観的類似度行列に対して非計量的MDSを行った結果から、刺激の形状-同定情報と方位-変換情報による付置が現われているかどうかを検討することができる。もし両情報が独立に知覚されているとするならば、両情報を混合したSVTV条件でも、その布置の中に、形状-同定情報に対応する付置と方位-変換情報に対応する付置を、それぞれ独立した次元により張られる部分空間として見出すことが出来るはずである。正準相関分析により、3条件の付置の関係を調べることで、いくつかの共通特性が導出できるか（何組の正準変量が有意に導くことが出来るか）を検討した。そして、それぞれの共通特性の意味を、正準負荷量から検討した。

具体的には、まず2つの実験条件において求められた布置における各刺激項目の各次元での座標値を変数として、布置間の正準相関を求めた。そして、正準負荷量をそれぞれの次元について求めることで、各刺激布置のどの次元が布置間の共通した表現空間に寄与しているかを分析した。正準負荷量とは、求められた正準変量の意味を解釈する上で最も重要な値であり、変数集合ごとの正準変量と特定の変数との間の積率相関を示している。正準変量を直接観測することはできないため、各変量がどのような情報をもっているかは、個々の変量と最も関連がある観測された変数を調べることにより明らかにすることが出来ると考えられる。SVTV条件とSV条件、そしてSVTV条件とTV条件とが比較され、それぞれの類似性に寄与している次元によって張られる刺激空間が、どのような刺激図形の特性を反映しているかが検討された。

2.2.3 結果

まず、被験者間の判断の一致度を示すケンドールの一致度係数(W)に関しては、3条件すべて0.1%水準で有意差が見られた(SV条件.377, TV条件.669, SVTV条件.512)。このことは、被験者の類似性判断がある程度一致していたことを示している。

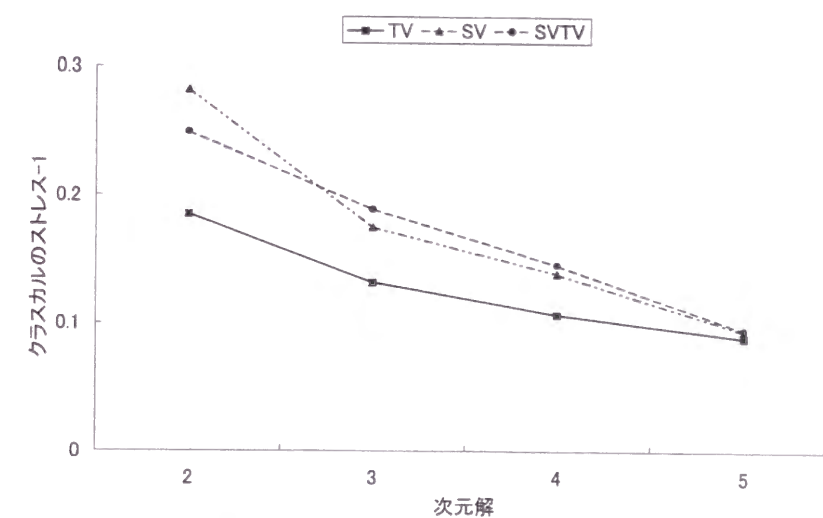


図 2.6: 実験条件ごとの次元解とストレス-1の変化

図 2.6 にそれぞれの実験条件での各次元解におけるストレス値の変化を示す。TV条件において、2次元解から3次元解へにおいてストレス値が大きく減少し

ているため（.185 から.132），3 次元解を TV 条件において採択した．後の 2 条件については，TV 条件の布置におけるストレス値と近い値をとる 4 次元解を採択した（SV. 139，SVTV. 146）．表 2.1 に各条件での各被験者のそれぞれの次元に対する重みを示す．

表 2.1: 各実験条件での各被験者の個々の次元に対する重み

被験者番号	重み係数			
	第1次元	第2次元	第3次元	第4次元
TV				
1	0.81	0.33	0.21	
2	0.95	0.08	0.00	
3	0.83	0.24	0.27	
4	0.67	0.46	0.38	
5	0.82	0.36	0.11	
6	0.53	0.52	0.40	
7	0.92	0.14	0.17	
8	0.67	0.39	0.52	
9	0.54	0.58	0.38	
10	0.85	0.28	0.18	
SV				
1	0.57	0.32	0.44	0.26
2	0.37	0.39	0.47	0.56
3	0.36	0.35	0.29	0.37
4	0.77	0.34	0.34	0.17
5	0.25	0.28	0.18	0.26
6	0.78	0.23	0.26	0.24
7	0.49	0.27	0.31	0.31
8	0.64	0.47	0.15	0.16
9	0.59	0.45	0.32	0.18
10	0.39	0.27	0.37	0.63
SVTV				
1	0.67	0.30	0.45	0.46
2	0.59	0.26	0.49	0.51
3	0.32	0.40	0.26	0.26
4	0.55	0.26	0.42	0.29
5	0.15	0.59	0.41	0.40
6	0.33	0.77	0.25	0.29
7	0.17	0.25	0.29	0.24
8	0.64	0.52	0.37	0.31
9	0.45	0.30	0.34	0.48
10	0.55	0.42	0.48	0.47

次に，SV 条件(4 次元解)と SVTV 条件(4 次元解)，そして TV 条件(3 次元解)

と SVTV 条件(4 次元解)の 2 つの組み合わせに関して正準相関分析が行われた．まず，SVTV 条件において形状-同定情報を符号化した次元を明らかにするために，SVTV 条件の 4 つの次元における各項目の座標値，そして SV 条件の 3 つの次元における各項目の座標間の正準相関が求められた．その結果，2 つの有意な正準変量の対が求められた．それぞれの正準相関は.999 と.993 で両者とも 5%水準で有意であった．表 2.2 にそれぞれの変量に対する正準負荷量を示す．正準負荷量から，第 1 正準変量が SVTV 条件の第 3 次元と SV 条件の第 4 次元と関係しており，第 2 正準変量が SVTV 条件の第 2 次元と SV 条件の第 1 次元と関係していることが分かる．つまり，SVTV 条件と SV 条件において得られた刺激布置は，有意にこれらの次元において類似しているといえる．図 2.7 にこれらの次元での刺激布置を示す．

そして，SV 条件と SVTV 条件の形状-同定情報を表現した類似性空間の各次元がどのような意味を持っているかを検討した．第 1 正準変量(第 4 次元 SV，第 3 次元 SVTV)は，水平方向における主軸の位置を現している．それに対して，第 2 正準変量は垂直方向における最も長い特徴線分の位置を現している．

表 2.2: SV 条件と SVTV 条件において導出された布置における刺激の座標間の正準相関および正準負荷量

変数	正準変量	
	第1	第2
SV		
第1次元	0.109	-0.962
第2次元	0.422	-0.334
第3次元	-0.018	-0.055
第4次元	-0.896	-0.270
SVTV		
第1次元	0.275	0.165
第2次元	-0.472	0.790
第3次元	-0.719	-0.624
第4次元	-0.327	0.451
正準相関	0.999	0.993

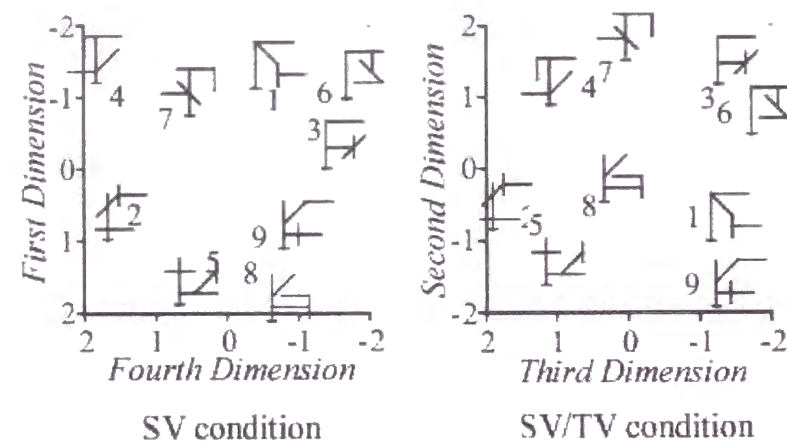


図 2.7: 被験者全員の類似性判断データに基づいて導出された形状-同定情報を符号化した表現空間。各軸のラベルは、ALSCALにおける解の次元に対応している。2つの布置は、正準相関分析から互いに類似しており、共通した表現形式をもっていると考えられる。

さらに、SVTV条件の第4次元とTV条件の第3次元とを比較することで、SVTV条件において形状-同定情報とは独立に回転と剪断に関する情報が符号化されているかどうかを検討した。その結果、2つの正準変量の対が得られた。それぞれの正準相関は.998と.975であった ($p < .05$)。表 2.3 に各正準変量に対する正準負荷量と正準相関、そして図 2.8 に負荷量に基づいた変換空間を示す。図 2.8 から、第1正準変量は剪断変換を、そして第2正準変量が回転変換を符号化していることが分かる。

表 2.3: TV条件とSVTV条件において導出された布置における刺激の座標間の正準相関および正準負荷量

変数	正準変量	
	第1	第2
TV		
第1次元	-0.854	-0.070
第2次元	0.080	0.996
第3次元	-0.468	-0.020
SVTV		
第1次元	0.823	-0.450
第2次元	0.097	0.281
第3次元	0.382	0.042
第4次元	0.359	0.898
正準相関	0.998	0.975

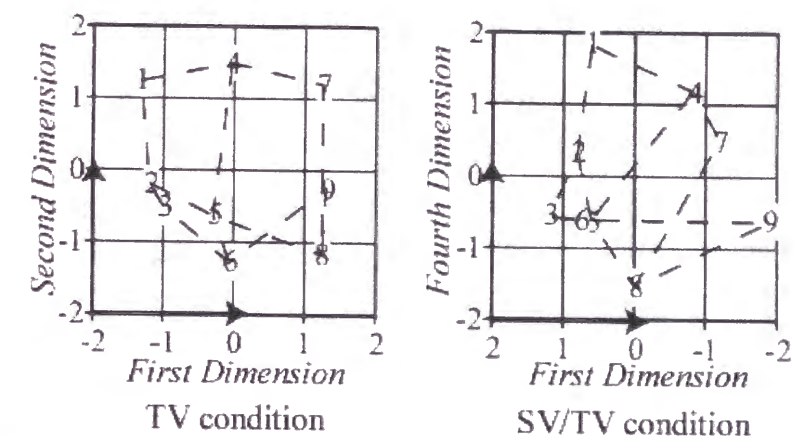


図 2.8: 被験者全員の類似性判断データに基づいて導出された方位-変換情報を符号化した表現空間。各軸のラベルは、ALSCALにおける解の次元に対応している。2つの布置は、正準相関分析から互いに類似しており、共通した表現形式をもっていると考えられる。

2.2.4 考察

同じ構造的性質を持つような無意味図形を用いた類似性判断課題から、人間が、図形の形状を形の特徴(形状-同定情報)と変換パラメータ(方位-変換情報)の2つの独立した要因として知覚していることが明らかにされた。

まず、形状空間においては、図形はその主軸と主軸に直交した最も長い特徴線分との間のカテゴリー的空間関係に基づいて符号化されていた。第1正準変

量が主軸の水平方向における位置、そして第2正準変量が最も長い線分特徴の垂直方向における位置に関する情報をそれぞれ表していた。つまり、図形の全体的な形状が、二次元的に表現されていた。こうした多次元空間内における特徴間の空間関係は、形状の大局的な構造記述の表現基盤となっておりと考えられる(Quinlan, 1991)。

一方、変換空間は、変換を規定するパラメータ(回転角と剪断角)によって張られた空間となっていた。つまり、構造的に正立な図形に対して、どのような変換が適用されていたかを符号化していたと考えられる。形状空間において、プロトタイプ的な形状が符号化されていたのに対して、変換によって知覚される形状がどう変化するかが符号化されていた。

透視変換の線形近似としてのアファイン変換は、スケーリング、剪断、回転の基本行列の積に分解することが出来る。したがって、剪断変換は三次元変換の成分の一部を反映していると捉えることが出来る。剪断変換が変換に関する奥行き成分を反映しているすると、本実験の結果は、被験者が効率的に変換全体を二次元と三次元成分に分けて認知していることを示唆している。

このように、知覚形状をそれぞれ独立した形状空間と変換空間において符号化していたことは、物体の脳内表現の性質という観点からはどのような意味を持っているとみなすことができるかを考える必要がある。視点依存型の内部表現を仮定する認識理論においては、形状と方位は表現内で統合されているとされている。しかし、形状知覚が方位の影響を受けることは、すでに先行研究において明らかにされている(Cooper & Shepard, 1973; Shepard & Cooper, 1982)。様々な方位で提示されたアルファベットが標準形か鏡像形かを判断する課題において、正立方位から離れるにつれて判断時間に単調な増加がみられる。CooperとShepardは、判断の手がかりを先行して与える実験パラダイムを用いて、どのような情報が鏡像判断に関与しているかを検討した。その結果、刺激の同定情報と方位情報とを両方とも手がかりとして与えた場合のみ、鏡像判断における方位効果は消失した。それに対して、同定情報か方位情報のいずれかしが手がかりとして与えなかったときは、単に100 ms程度反応が速くなるだけであった。この結果は、鏡像識別課題においての方位効果が形状-同定情報と方位情報とが統合された表現を基礎として生じていることを示唆している(先行研究の概説としてはGauthier & Tarr, 1997を参照)。視点依存表現を仮定する立場においては、こうした知見から物体がそれぞれその形状と姿勢が統合された景観の

集合として貯蔵されていると考えている。こうした形状に基づいた物体表現は、人間の認識特性である頑健性と柔軟性を説明するためには、いくつかの問題点を持っていた。特に、どのようにして特徴を求めるか、そしてどのようにして効率的に記憶探索を行っていくかという点は非常に重要であった。本実験において、方位-変換情報は、知覚された特徴の形状内での位置が、典型的位置に対してどの程度異なっているかを反映していた。例えば、「足」のような部分的特徴が、観察者に対して右方向に位置している場合、その形状は反時計回りに90度傾いているとみなすことができる。しかし、このような情報が意味をもつのは、「足」を持つような事例を典型的事例として含むカテゴリーに対して参照することが可能である場合のみである。つまり、部分が全体において特定の位置にくる確率が高い事例を含んだカテゴリーが実在することと、そのようなカテゴリーを呼び出すことが可能であることが必要になる。このことを示すためには、構造的に正立である形状間の関係を反映した形状空間を導出するために、方位空間がどのように関与しているかを検証する必要がある(第3、第4章)。

神経心理学的知見と本実験において導出された類似性空間についての検討から、形状-同定情報と方位-変換情報はそれぞれ異なる空間関係のコード化を反映していると考えられる(図2.9)。腹側系においては、部分が形状全体に基づいて表現されているのに対して、背側系では部分は全体とは独立に表現されている(Humphreys & Riddoch, 1994)。背側系における視覚的動作制御の機能との関わりは次のように考えることができる(Milner & Goodale, 1995)。道具使用を考えた場合、道具のハンドルの部分と他の物体に対して作用する効果器の部分が特に意味を持っており、道具の全体的形状はあまり重要ではない。したがって、部分を全体から独立して表現していることは、動作制御にとって効率的な物体表現の形式であるといえる。本実験で用いた図形の構造的性質(主軸に対する脚部の観察者から見たときの上下方向)が、方位-変換情報を決定しているという考え方は、先行研究からも支持される(McMullen & Jolicoeur, 1992; Rock, 1973, 1974)。

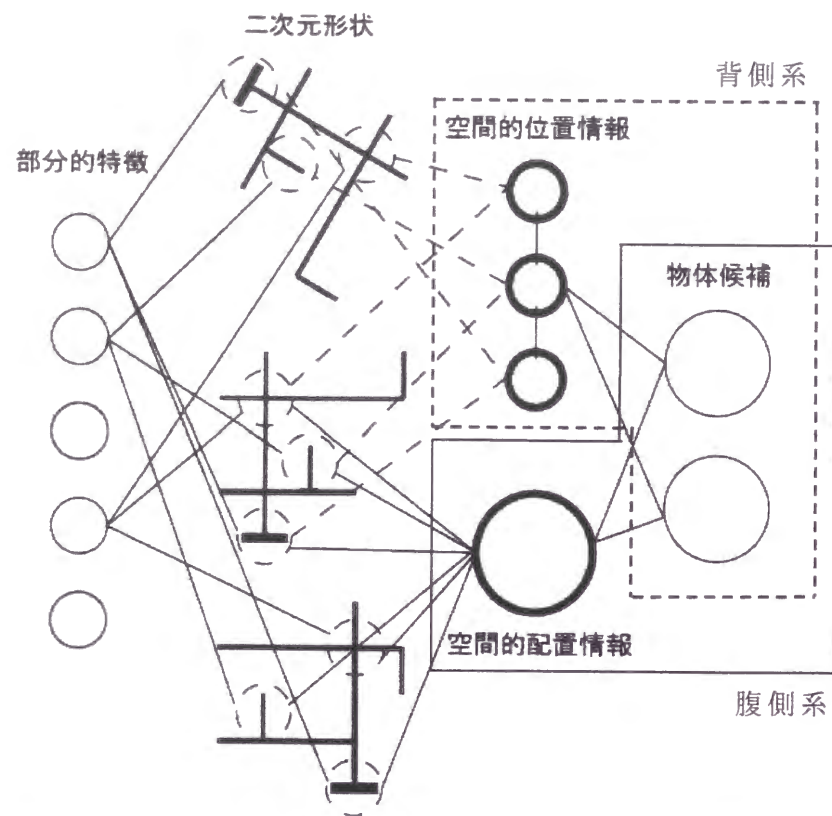


図 2.9: 形状知覚における二重の処理経路。空間的配置情報が腹側系、空間的位置情報が背側系の処理経路を反映していると考えられる。

本実験で明らかにされた方位 - 変換空間は、形状クラスに特異的に形成されるものである。さらに、それぞれの特徴の形状内における位置に関する事前分布にしたがって、その軸の尺度は変化すると考えられる。我々は、これまで認識成績が課題内容に大きく依存していることを明らかにしてきた（杉尾・乾, 1995a, b）。つまり、認識対象の物体だけではなく、どのような物体集合が認識候補としてあるかを規定する課題状況に依存した動的な内部表現の形成を考えていく必要がある。

第 3 章 形状知覚における自動的なプロトタイプ生成

3.1 はじめに

第 2 章において、人間が、形状知覚において物体が何であることを示す形状 - 同定情報と、物体がどの程度変換がなされているかを示す方位 - 変換情報とを独立に知覚していることが明らかにされた。しかし、形状 - 同定空間において符号化されていた変換が適用されていない、構造的に正立な形状がどのようにして獲得されたかは明らかになっていない。おそらく、認識系は知覚された形状に含まれる部分的特徴の位置に関する事前知識を制約として、同定可能な物体の典型的形状を推定していると考えられる。本章では、物体形状のカテゴリーにおける典型的な事例、またはプロトタイプを人間がどのようにして学習しているかを心理実験により検討した。

3.2 心理実験

3.2.1 目的

本実験では、再認記憶手続きを用いて、図形学習時のプロトタイプの役割について検討した。再認記憶手続きとは、記憶の測定法の 1 つであり、一般には学習段階とテスト段階の 2 段階から構成されている。刺激材料を一通り学習した後で、学習した図形（ターゲットと呼ばれる）と学習していない図形（ディストラクタと呼ばれる）をランダムな順序で提示し、被験者がターゲットとディストラクタのいずれであるかを識別できるかを調べる。被験者の反応は、当て推量による正答を補正するために、信号検出理論に基づいて分析されることが多い。信号検出理論に基づいて、被験者がどのような刺激の特性に関して識別力と反応バイアスの変化を示していたかを見ることにより、学習図形に関してどのような特性を符号化しているかが明らかになる。

図形の符号化が、形状 - 同定情報と方位 - 変換情報のそれぞれで独立に行われているとすると、図形が「傾いている」として認知されるならば、図形に関して符号化されている情報は、方位に依存した形状と方位を求めるために基準

となる構造的に正立な方位におけるプロトタイプ的な形状の両方を含んでいると考えられる。実験では、正立以外の方位において学習した図形に関して、複数の異なる方位（正立方位を含む）において再認記憶を測定することにより、傾いた図形を学習したときに、どのような情報が符号化されているかについて検討した。

このように、本章は、再認記憶手続きを用いて、人間が構造的にプロトタイプと判断される形状を、形状知覚過程で獲得しているのかどうかを明らかにすることを目的とする。

3.2.2 方法

被験者は、第2章における類似性判断実験時に作成された刺激図形集合からランダムに選ばれた5つの図形からなる学習リストを1つずつ提示された後、テスト段階において学習した方位と学習していない方位の両方において再認記憶が測定された。学習段階では、すべての図形が正立に対して120度平面上で回転した方位で提示された。それに対してテスト段階では、図形が0度から300度まで60度刻みで6つの方位のいずれかで提示され、その方位で提示されたときに学習した図形とそうでない図形とを識別できるかが測定された。

被験者

京都大学の大学院生6名。

材料および装置

実験において使用された刺激図形、および刺激装置は第2章において用いられたものと同じであった。刺激図形の大きさは、高さ4 cm（視角2.7度）、幅2.2 cmから2.5 cm（視角1.5度から1.7度）であった。そして、4000個のランダムに配置されたピクセルからなる正方領域から形成されたマスク刺激の大きさは、各辺9 cm（視角6度）であった。

図形は学習時に時計回りに120度の方位で学習され、テスト方位は0度から60度刻みの6方位で提示された。

手続き

図3.1に実験手続きを示す。実験は各試行において学習段階とテスト段階の2段階から構成された。最初に学習段階において、学習図形が画面中央にピープ音と共に1500 ms提示された後、マスク刺激が100 ms提示された。5つの学習図形が、このように順番に1つずつ提示された後、テスト段階に移った。テスト段階では、まず最初に固視点が画面中央に500 ms提示された後、テスト図形が6つの方位のいずれかにおいて提示された。被験者は予め割り当てられたキーを押すことにより、提示されたテスト図形が、学習したものであったかそうでないかを可能な限り速く正確に反応するように求められた。ただし、反応が3000 msを超えた場合は誤答として扱われた。反応に対するフィードバックは与えられなかった。

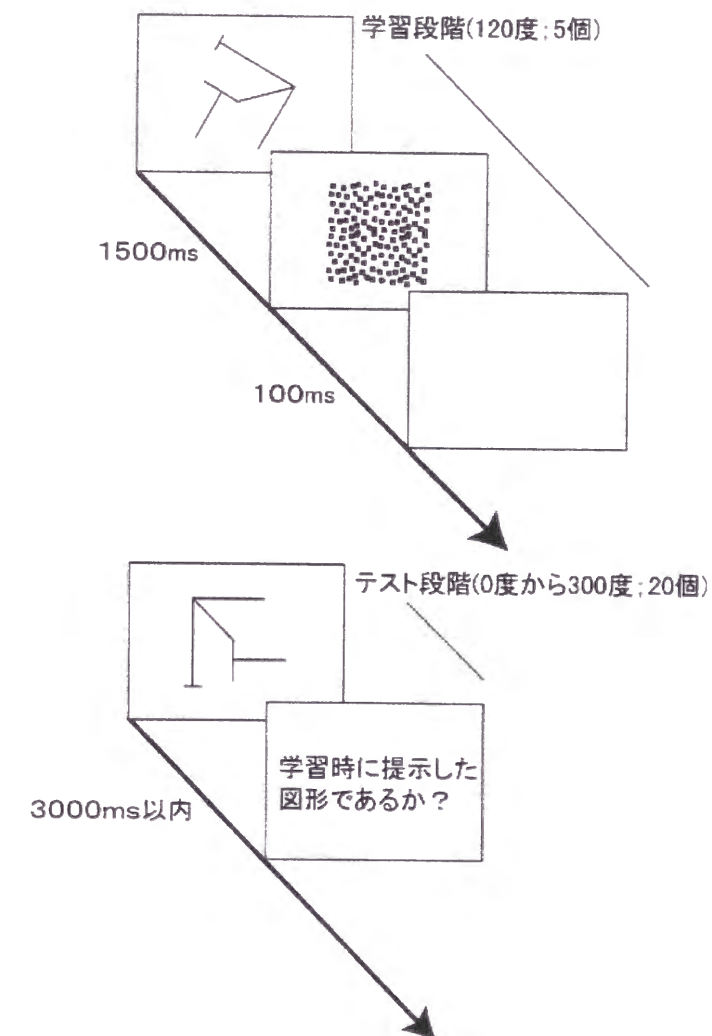


図 3.1: 実験手続き

テスト図形は各試行において 20 個が提示された（学習図形 10, 学習方位で 5, 非学習方位で 5, そして非学習図形 10, 120 度で 5, それ以外のテスト方位でそれぞれ 5）。被験者には, 各試行後 20 個中正答がいくつあったかが伝えられた。実験全体で計 50 試行で, 25 試行終了後 5 分間の休憩が与えられた。

3.2.3 結果

被験者の反応データは信号検出理論に基づいて次の 2 つの統計量に要約された。1 つは, テスト段階での学習した図形とそうでない図形との識別力を示す d' であり, 次式により求められた。

$$d' = Z(\text{hit_rate}) - Z(\text{false_alarm_rate}) \quad (3.1)$$

もう 1 つは, 反応バイアスを示す C であり, 次式により求められた。

$$C = -0.5[Z(\text{hit_rate}) + Z(\text{false_alarm_rate})] \quad (3.2)$$

ここで Z は, ヒット率(hit rate)とフォルスアラーム率(false alarm rate)を Z 得点に変換する関数であり, 値が .5 のとき 0 をとり, それよりも大きい場合は正, 小さい場合は負の値をとる。ここで, ヒット率は, 学習図形に対して正しく学習した項目と判断した比率であり, フォルスアラーム率は非学習図形に対して誤って学習した項目と判断した比率である。ここで反応バイアスとは, 特定の反応を好む傾向であり, C は信号検出理論において, 新項目と旧項目の分布の交差位置に対する判断基準の位置を表している。つまり, 全くバイアスがない状態では値は 0 をとる。正の値は反応がより慎重であるバイアスが働いていることを意味している。つまり, フォルスアラーム率がミス率(miss rate)よりも低くなっていることを示している。尤度比 β の代わりに, C を反応バイアスの指標として用いることには, 被験者がテスト項目に対する記憶強度のみ分かっているだけで十分であるために, 心理学的な妥当性があるとされている(Lockhart & Murdock, 1970; Snodgrass & Corwin, 1988)。

図 3.2 および 3.3 において, それぞれテスト時の刺激方位に対する被験者 6 名の識別力と反応バイアスの平均値を示す。両統計量に関して, テスト方位 (6 水準) を要因とした被験者内 1 要因の反復測定による分散分析を行った。感度に関しては, 方位による影響が有意であった ($F(5,25)=2.677$, $MSe=.060$, $p<.05$)。線形性の検定から, 1 次と 2 次に関する傾向が有意であった ($F(1,25)=4.432$, $p<.05$; $F(1,25)=5.280$, $p<.05$)。1 次成分により 33.2%, 2 次成分により 39.5% の

方位の影響が説明可能であった。2 次以上の傾向は有意でなかった。どの水準において有意差が生じたのかを検討するために, シェッフエの方法による事後検定が行われた。線形対比の重みは, テスト時の 6 方位に対して, それぞれ .5, -.25, .5, -.25, -.25, -.25 であった。検定の結果, 0 度と 120 度のグループとそれ以外の方位のグループとの間に有意差がみられた ($F(1,25)=7.013$, $p<.05$)。

反応バイアスに関しても, 分散分析の結果, 方位の効果は有意であった ($F(5,25)=3.788$, $MSe=.026$, $p<.05$)。シェッフエの方法による事後検定の結果, 0 度と 120 度のグループとそれ以外の方位のグループとの間に有意差がみられた ($F(1,25)=16.949$, $p<.01$)。感度と反応バイアスに関して, 他に有意な効果はみられなかった。

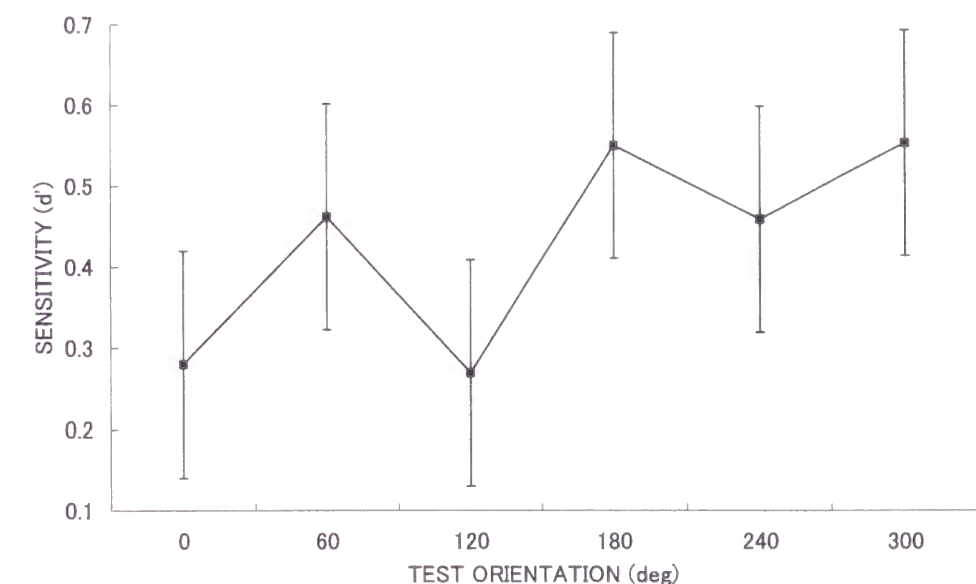


図 3.2: テスト時の提示方位に対する感度。エラーバーは Loftus & Masson (1994) による被験者内誤差を示す。

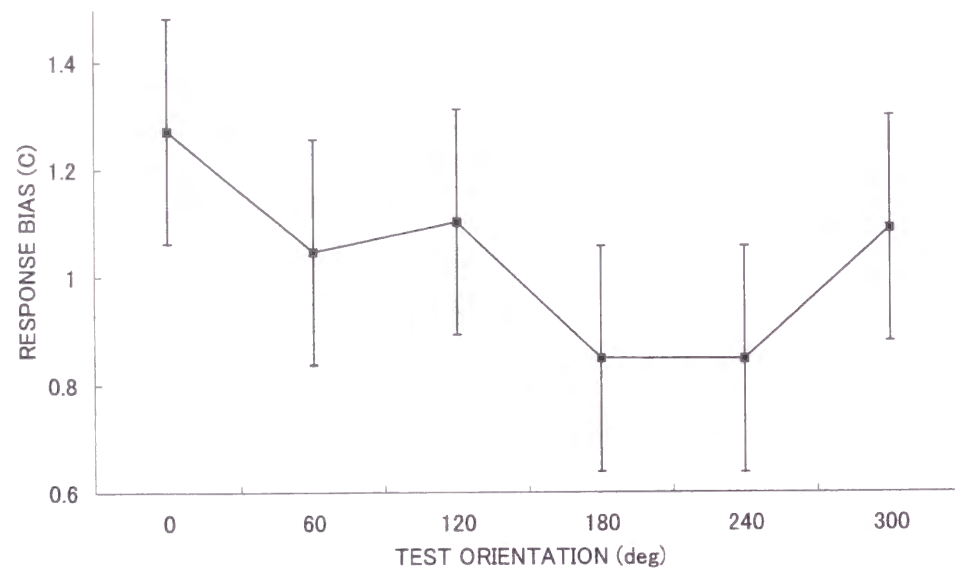


図 3.3: テスト時の提示方位に対する反応バイアス。エラーバーは Loftus & Masson (1994)による被験者内誤差を示す。

3.2.4 考察

心理物理的手法を用いた実験において、内部表現と遂行成績との関係の解釈は必ずしも容易ではない。仮に、内部表現が方位に依存しない物体の形状を記述していたとしても、適切な内部表現を呼び出す処理過程が方位に依存している事態は十分に起こりうる(Liu, 1996)。

まず識別力から(図 3.2), 図形を学習した方位(120 度)と図形の構造的情報から最も正立的である方位(0 度)の両方において、他の方位よりも識別力が低下しているのがみられる。識別力は、ターゲットとディストラクタとの間の主観的類似度を反映している。このことからこの結果は、学習方位と典型的方位の両方で、形状 - 同定情報が異なっても、方位 - 変換情報が共通しているために、主観的類似度が高く判断されて、結果として識別力が低下したと考えることができる。このことは、本実験で用いたような、方位や変換を示す構造的情報(主軸を持ち、特定の空間的位置に一般にみられる部分的特徴が存在している)を持つ形状を学習する時に、構造的情報を利用することにより、方位に依存しない表現を内的に自動生成している可能性を示唆している。

さらに、学習方位とプロトタイプの方位においては反応バイアスが他の方位

よりも高い傾向がみられた(図 3.3)。このことは、学習した方位で提示された図形と正立方位において提示された図形に対して、より学習した図形であったと反応する傾向が高かったことを意味している。このことから、学習した方位とプロトタイプの方位に関しては、より小さい知覚的活性量に基づいて反応が可能であったことが分かる。つまり、方位に関する情報を処理することで、保持している形状の記憶表現に対するアクセスが促進されたことを反映している。

本実験の結果は、物体認識に関する画像ベースの理論において提唱されている仮想的景観(virtual view)と関連していると考えられる(Vetter & Poggio, 1994; Vetter et al., 1994)。Vetter と Poggio は、対称性などの物体の形状における規則性を利用することにより、物体の三次元モデルの学習に必要な景観の数を減らすことが可能であると主張している。本実験の結果からは、特定の方位において図形を学習したときに、図形の特徴が一般的にはどのような位置にあるかというプロトタイプの知識への参照を行うことで、図形のプロトタイプの方位における形状を仮想的に生成していると考えられる。

正立方位が、物体の形状が最も典型的に観察される方位を示しており、新奇な物体の形状に対しては、カテゴリー的知識が関与しているとするならば、本実験の結果は、人間が学習した図形の形状に対して事例的情報(学習方位)とカテゴリー的情報(正立方位)の両方を記憶していることを示していると考えることができる。第 4 章では、個々の景観に基づいて整合性を保った物体としての表現を獲得する際に、どのような形状の符号化がなされているかを検討する。

第4章 形状-同定情報の符号化における方位-変換情報の影響

4.1 はじめに

視覚的物体認識研究においては、主として、物体が脳内でどのように表現されているかという問題が扱われてきた。しかしながら、こうした物体表現がどのようにして学習されるかも、同様に重要な問題である。視点不変な形状知覚を達成するためには、物体の見かけの違いが、同じ物体を示しているのか、違う物体を示しているのかを判断する必要があった(第2章)。同様に、新しい物体の表現を獲得する際にも、異なる二次元画像から、共通した三次元構造を持つ物体として、整合性を持った表現が獲得されるためには、両者が独立して処理されなければならない。

こうした表現獲得の問題に対する計算論として、時間的近接性に基づいた学習が提唱されてきた(Wallis, 1996; Wallis & Bülthoff, 1999)。一般に、ある時刻において観察された物体画像と、すぐ後の時刻において観察された物体画像は、同じ物体を示している可能性が高いと考えられる。生理学的にも、画像的な類似性とは無関係に、時間的な生起の近接性に基づいて2つの異なる形状が学習されたことを示すデータが得られている(Miyashita, 1993)。このことは、2つの異なったアスペクトを持つ形状間の連合を学習するために、時間的近接性に基づいた学習は、有効なスキーマの1つであることを示している。

それに対して、2つの異なる物体の景観が同じ物体を反映しているかどうかの判断は、その物体の構造に対して参照することによっても達成可能である。物体の構造的情報は、視点の変化に対して安定しているために、2つの異なる景観を結びつける共通の基盤として機能しうる。視点の変化に対して安定して抽出可能な構造的情報としてはいくつか挙げることができる。1つは、形状の中心軸に基づいた表現である。中心軸に基づいた表現では、物体を構成している部分をその中心軸（主軸）のみにより表現することで、部分間の関係を明確にし、面の視点依存的な特性（面など）を排除した情報が記述される。こうした表現は、ジオン構造記述(Biederman & Gerhardstein, 1993)とは異なり、二次元

的な視覚画像から細線化などの手法により導出可能である。しかしながら、こうした中心軸に基づいた表現は、物体を個別に同定するためには粗すぎる表現であるという問題点がある(Tarr & Bülthoff, 1998)。

こうした明示的な形で構造的情報を利用する考え方に対して、局所的な部分的特徴間の関係から、暗示的に構造的情報を表現するという考え方が提唱されてきた。視覚画像のいくつかの位置において、局所的に測定された形状データの集合として物体の形状を表現することで、暗に形状の構造的情報が利用可能となる(Bricolo et al., 1997 など参照)。こうした構造的情報に基づいて、異なる景観の間関係を導出することにより、物体表現を構築することができると考えられる。

第2章および第3章における心理実験から、次の点が明らかにされた。物体の知覚された形状は、形状内の特徴の空間配置を反映した構造的情報を符号化した空間と、形状内での特徴の空間位置をカテゴリー的知識に基づいて評価された方位-変換情報を符号化した空間とに独立して表現されていた。このような構造的情報の連続的な変化を多次元的に表現した空間は、潜在的にはカテゴリーごとに可能な構造的情報を符号化していると考えられる。つまり、あらかじめどのような構造が可能であるかに関する候補が表現されていると捉えることができる。このように考えると、第3章の結果は知覚形状を説明する構造的情報のみに基づいて判断を行ったために、学習した方位と正立方位で再認成績が低下したといえる。第4章では、第3章と同じ再認記憶手続きを用いて、自動的に正立方位に関する表現を獲得するためには、どのような符号化特性が必要とされるかを明らかにした。

4.3 心理実験

4.3.1 目的

本実験は、異なる観点から物体表現の学習における構造的情報の役割を明らかにすることを目的とする。形状の方位情報により、形状の符号化特性（構造的情報にどの程度依存しているか）がどのように変化するかを再認記憶手続きにより検討した。もし被験者が、形状の構造的情報を符号化していたとすれば、構造的に類似性が高いディストラクタが提示されたときに、再認成績は

低下すると考えられる。

4.3.2 方法

被験者

京都大学の大学院生 6 名。

材料および装置

5 つの線分特徴をランダムに配置することにより作成される図形 400 個が用いられた (図 4.1)。400 の内、200 がターゲット刺激、残りの 200 がディストラクタ刺激として用いられた。刺激図形の大きさは 4.8 cm×4.8 cm (視角にして 3.2 度×3.2 度)。マスク刺激は、9.0 cm×9.0 cm (視角にして 6.0 度×6.0 度) の正方領域内にランダムに配置された 150 の線分から構成されたパターン図形が用いられた。

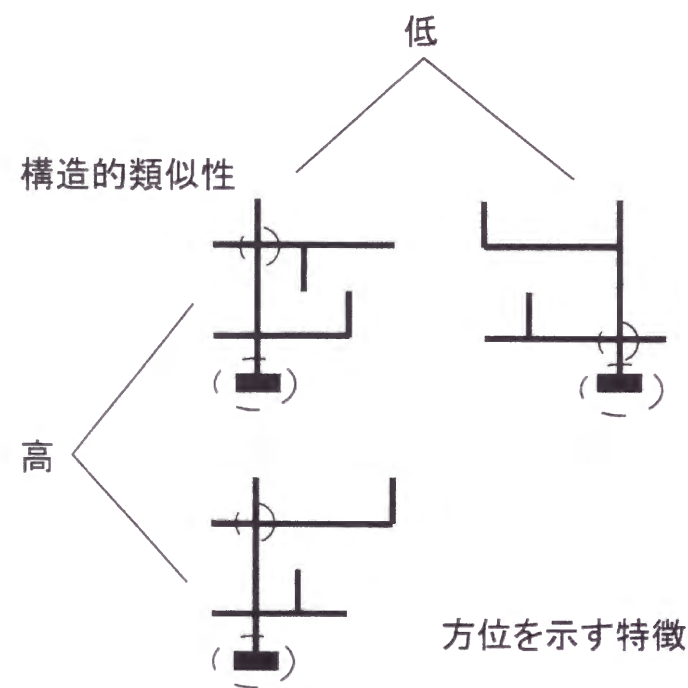


図 4.1: 実験において用いられた刺激図形の例。第 2 章の結果から、構造的情報を主軸と直交する最も長い水平特徴線分との交差位置（点線内）により定義した。

類似性判断実験の結果から、各刺激図形の構造は図形の主軸と直交する最も長い線分特徴との交差位置により定義された。交差位置は 16 通りあり、4 つの

領域に分けられた (左上, 右上, 左下, 右下)。2 つの図形が正立方位において、共通した領域に交差位置がくるとき、2 つの図形は同じ構造をもっているとみなされた。さらに、主軸の下部には、図形の正立性を示すために「足」的な線分特徴が付けられた

デザイン

1 セッションは、20 の学習とテスト段階からなる試行から構成された。各試行においては、学習リストは 200 の予め作成されたターゲット図形集合から被験者ごとにランダムに選ばれたから 10 の図形からなり、テストリストは全く同一の学習リストの図形 10 と 200 の予め作成されたディストラクタ図形集合から被験者ごとにランダムに選ばれた 10 の図形を合わせた 20 の図形から構成された。全 20 試行中、10 試行ではターゲット図形とディストラクタ図形との構造的類似性が高く、残りの 10 試行では両者の構造的類似性は低いように設定された。10 のターゲット図形中 5 つは学習段階とテスト段階との両方で 0 度で提示され、残りの 5 つは時計回りに 120 度で提示された。つまり、学習リストにおいて図形は 0 度 (正立方位) か 120 度 (回転方位) のいずれかで学習され、テスト段階においても学習段階と同一の方位で提示された。このように、実験変数は刺激図形の方位 (正立か回転か) とターゲットとディストラクタ間の構造的類似性 (高いか低い) の 2 つであった (被験者内 2 要因計画)。

手続き

図 4.2 に実験手続きを示す。実験セッションの初めに被験者はいくつかの継時的に提示される図形を順番に学習し、その後に提示された図形に関してテストがなされると告げられた。学習段階では、固視点が画面中央に 250 ms 間提示されたあと、各刺激図形がピープ音に続いて画面中央に 2000 ms 間提示された。その後、マスク刺激が 100 ms 間同じく画面中央に提示された。被験者は、提示された図形をできるだけ正確に記憶するように求められた。学習図形が順番に 10 提示された後、直後に再認記憶実験 (テスト段階) が開始された。テスト段階では、固視点が画面中央に 250 ms 間提示された後、テスト刺激図形が提示された。被験者は、提示された図形が学習した 10 の図形に含まれている場合は「はい」、そうでない場合は「いいえ」と予め割り当ててあったキーを押すことにより反応した。テスト刺激図形の提示開始から、被験者のキー押しまでの時間が

反応時間として測定された。被験者はできるだけ速く正確に反応することが求められ、反応に対するフィードバックが与えられなかった。反応後、250 ms の間隔をおいて次のテスト図形が提示され、20 のテストリストの図形がすべて提示された後、次の試行に移った。

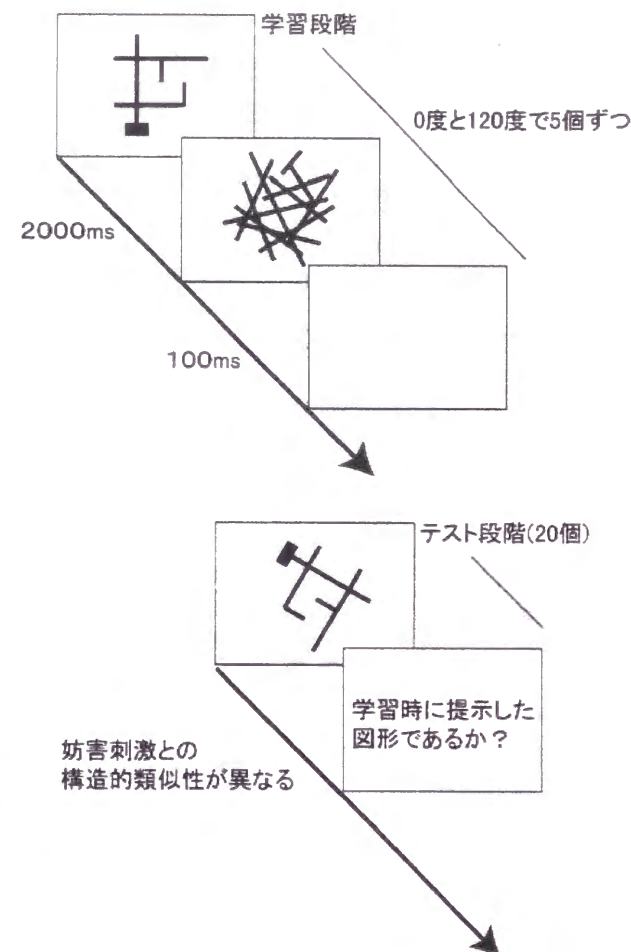


図 4.2: 実験手続き

4.3.3 結果

被験者の反応データはヒットとフォルスアラームに基づいて分析された。信号検出理論に基づいて、感度と反応バイアスが各実験条件ごとに求められた。表 4.1 に、被験者間のヒット率の平均、フォルスアラーム率の平均、ヒットに対する反応時間の平均、そしてフォルスアラームに対する反応時間の平均、そして感度と反応バイアスの平均を示す。2×2 の反復測定分散分析をヒットの反応時間に対して行い、図形の方位（正立か回転か）と構造的類似性の要因の間

に有意な交互作用がみられた（図 4.3, $F(1,5)=20.26$, $MSe=1426.94$, $p=.006$ ）。最小有意差法による事後検定から、構造的類似性が高い条件において正立方位と回転方位との間に有意差（902 ms – 988 ms, $t=-3.94$ ），そして構造的類似性が高い条件での回転方位と構造的類似性が低い条件の正立方位（988 ms – 927 ms, $t=2.82$ ），そして回転方位について構造的類似性が高い条件と低い条件との間（988 ms – 874 ms, $t=5.25$ ）に有意差がみられた（すべて 5% 水準）。その他の測度に関して、統計的な有意差はみられなかった。

表 4.1: 被験者間の平均反応時間（ms）とヒット率とフォルスアラーム率，および感度（d'）と反応バイアス（C）

変数	反応時間		反応比率		感度 (d')	反応バイアス(C)
	H	FA	H	FA		
高類似度						
正立	902	964	0.69	0.35	0.88	-0.06
回転	988	1061	0.64	0.40	0.61	-0.05
低類似度						
正立	927	1010	0.67	0.31	0.93	0.03
回転	874	984	0.68	0.33	0.90	-0.01

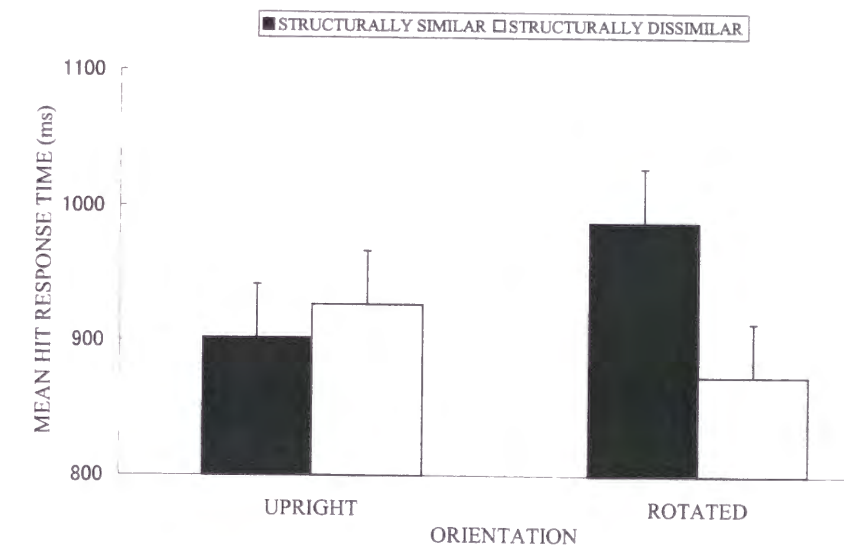


図 4.3: 各実験条件ごとの被験者 6 名間の平均ヒット反応時間（ms）。エラーバーは Loftus & Masson (1994) による被験者内誤差を示す。

4.3.4 考察

図 4.3 から明らかなように、ターゲット図形とディストラクタ図形間の構

造的類似性が高いとき、120 度の方位で提示された図形に対する平均ヒット反応時間は他の条件と比較して有意に長かった。このことから、傾いた図形を記憶するときに、構造的情報に基づいて符号化がなされていることが示唆される。反応バイアスは、条件間でほぼ一定であったことから、反応時間の差は反応方略の違いではなく、異なる方位における学習図形の形状の内部表現の特性の違いを反映しているとみなすことができる。知覚形状が構造的に正立である条件においては、構造的類似性が成績に影響しない、つまり構造的記述に基づかない画像的な符号化がなされていると考えられる。それに対して、知覚形状が構造的に傾いていると条件においては、相対的に構造記述に基づいた符号化がなされているために、類似した構造記述をもつ形状間の識別(高構造的類似性条件)で競合が生じるために、結果として反応時間が増加したと説明することができる。

本実験の結果は、傾いた図形を認識するためには、認識に先だって正立した典型的な方位における図形記述に対して特徴の対応関係を確立する必要があるために、より特徴の空間的位置に対して感度が高くなっていることを反映していると考えることができる。こうした形状の特徴間の空間対応関係の処理は、課題によってはメンタルローテーション現象として現われてくる(Shepard & Cooper, 1982)。さらに、構造的類似性が高い条件と比較して、構造的類似性が低い条件における回転形状の再認時間が約 100 ms 短くなっていることは、形状の方位を決定するために必要とされる時間に対応している(Cooper & Shepard, 1973)。

形状を構成している特徴の空間的配置と、空間的位置に関する情報が脳内で独立して表現されているならば、空間的配置に関する情報が十分に異なっているかどうかは、空間的位置に関する情報とは独立に求めることが可能であるはずである。本実験の結果は、特徴の空間的位置に依存して、形状の符号化経路が少なくとも 2 通り存在していることを示唆するものである。図形が正立で提示されたとき、形状-同定情報を直接求めることが可能であるために、よりテンプレート照合的に認識が行われる。それに対して、図形がある程度傾いているとき、形状-同定情報を得るために、図形を構成している特徴の位置をプロトタイプ的な位置に対して参照する必要がある。

物体表現を異なる景観から学習するという観点からは、本実験の結果は次の 2 点を示唆している。1 つは、正立方位における形状が他の方位における形状と

比較して特権的な役割をもっている可能性である(Palmer, Rosch & Chase, 1981)。こうした典型的方位が形成される理由の 1 つとして、構造的に正立な方位における形状が構造記述を生成する基準となっている可能性が考えられる。さらに、正立以外の方位から物体を学習するために、構造的に正立な方位での形状を参照していくことにより、異なる景観が同じ構造を保持しているかどうかを判断している可能性が示された。つまり、形状内の局所的特徴が典型的にはどの位置にくるかに関する情報が、異なる景観の関係を連合学習するために利用されていると可能性がある。

第 2 章から第 4 章までの心理実験から、次の 2 点が明らかにされた。

1. 形状知覚過程で、物体の同定に必要な形状情報と物体の方位に関する情報が独立して知覚されている(第 2 章)。
2. 「傾いた」形状を学習する過程において、
 - ・物体の構造的に正立な形状が同時に生成される(第 3 章)。
 - ・構造的情報に基づいた符号化がなされる(第 4 章)。特に、この過程はメンタルローテーションの基盤となっている可能性がある。

次章では、2 の 2 に関して、fMRI を用いて検討する。先行研究から明らかになりつつあるメンタルローテーションに関わる脳内領域と、非典型的景観からの物体認識に関わる脳内領域との関係をみていくことで、生理学的にどのようなモジュールが関与しているかを明らかにしていく。

第5章 機能的MRIを用いた視覚的物体認識の視点依存性の脳内機構

5.1 はじめに

前章まで、心理学的手法に基づいた実験的研究を通して、視覚的物体認識の基盤となる脳内における物体の形状表現の特性に関する検討を行ってきた。その結果、物体を同定するために必要な形状情報とは独立して、方位に関する情報が表現されていることが明らかにされてきた。物体の方位は、どのような物体の特徴に対して上下方向を割り当てるかにより決定されるため、個々の物体に依存しないような空間構造に関する知識を反映していると考えられる。

視覚的物体認識は、環境内に存在している物体を理解するための適応的機能である。さらに、生存上物体に対して何らかの操作的行動をとるために必要な情報を獲得することが重要な目的の1つとなる。特に、認識における視点不変性の問題を考えるときに、この点は大きな意味を持っている。単に物体が何であるかを理解するだけであるならば、視覚情報に対して頑健かつリアルタイムに認識が達成される必要は全くない。たとえ特定の範囲外の視点からの認識が困難であったとしても、多少の時間の損失や、自分自身が移動することで解消することが可能である。しかし、ある特定の目的を達成するために必要な動作系列をスムーズに実行していくためには、動作対象の認識が頑健かつリアルタイムに達成されなければならない。動作を行うために必要とされる物体に関する知識は、その物体がどのような機能を持っているかに関する知識が中心である。このことは、観察視点の変化に対して物体の機能的情報は安定して認知されている可能性があることを示唆している。

こうした視覚的物体認識の2つの役割は、視覚系そのものの役割と密接に関係している(Goodale & Humphrey, 1998)。1つは、知覚された環境の内的モデルを形成することであり、これはMarrが主張したところの二次元画像から三次元モデルを再構成する機能に対応している。もう1つは、知覚された物体に対して動作を行うために視覚入力を適切な運動指令に変換する機能である。リアルタイムに処理される必要があるのはむしろ後者である。視覚から運動へのマッピングを行うためには、対象が何であるかという同定情報よりも、対象が観察

者に対してどの程度傾いており、どの程度の大きさで、どの程度の距離に位置しているかという情報の方がより重要である。こうした2つの独立した視覚情報処理経路の存在は、近年の神経生理学のおよびPET研究において明らかにされてきた。Goodale & Milner (1992)は、腹側経路が物体視と背側経路が空間視という視覚経路の分類に対して、物体の形状、傾き、大きさ、位置といった属性は両経路において処理されているが、各経路でそうした情報に対して要求されている出力が異なるという新たな分類を提示した。一方で、物体の方位に関する知識が選択的に損なわれていることを示すような神経心理学的症例も報告されており(Turnbull, 1997)、実際に物体認識において、背側経路がどのような役割を果たしているかは依然として明らかでない部分が多い。

基本的な視覚機能が正常であるにも関わらず、物体認識能力が選択的に損なわれるような高次視覚処理の障害は失認(agnosia)と呼ばれている。多くの脳損傷事例から、失認は大きく2つに分類することができる。1つは、個々の視覚的特性に基づいて対象の全体的な像を形成することができない統覚型(apperceptive)と呼ばれるものである。そして、もう1つは、知覚表象に対して適切な意味を結びつけることができない連合型(associative)と呼ばれるものである。Warrington & Taylor (1978)は、統覚型失認患者が非日常的な視点からの物体認識が著しく損なわれていることを神経心理学的実験によって明らかにした。さらに、彼女らはこうした患者においては右半球後部の損傷が見られることから、まず知覚された形状に対して右半球後部において知覚的カテゴリ化により形状のよりプロトタイプの表現を呼び出した後で、左半球後部において意味的知識の検索が行われるという処理モデルを提唱した。しかし、多くの場合統覚型失認患者は日常的視点からの認識能力は正常に保たれており、仮に右半球における視点依存的表现に対する処理が必ず先行しているならば、こうしたモデルは矛盾していることになる(Davidoff & Warrington, 1999)。

多くの日常的な物体は、ある特定の方位の範囲内で観察されることが多いと考えられる。そのために、そのような典型的な方向からの記述に基づいて物体が記憶されていることには、生理学的な妥当性がある。逆に、非典型的視点からの認識においては、別のオプションな処理過程が必要とされることになる。このように、少なくとも2つの質的に異なる処理モジュールが、視点不変性を達成するためには必要となっている可能性がある。この点を検証するための1つの有効な手法として、物体認識時の正常な脳活動を測定することがあげられ

る。Kosslyn et al. (1994)は、脳内の血流量の変化を測定する手法の1つであるPET (positron emission tomography; ポジトロン放射形断層撮影法)を用いて物体を異なる視点(典型的視点と非典型的視点)から同定する場合の脳活動を測定した。彼らはまず始めに、サルや人間に関して得られている知見に基づいた物体認識のモデルを構成した。モデルにおいては、知覚された物体はまず視覚バッファ内に保持され、物体特性と空間特性とが別々に符号化される。符号化された情報に基づいて長期記憶内からの検索を行うが、符号化されている情報が不十分な場合(物体を非典型的視点から観察するときなど)には、トップダウン的に認識に有効な情報を探索するように注意を移動させて、新たに別の物体特性を符号化する。PETによる測定の結果、ほぼモデルから予測される活動がみられた。特に、典型的視点からと比較して非典型的視点から物体を同定する時に、前頭葉の背外側部(左47野, 右9/46野)がより強く活動していた(図5.1)。彼らはこの活動がトップダウン的な弁別的特徴の探索を反映していると主張した。KosslynらによるPET研究は、物体の景観の典型性に依存して、脳活動に違いが見られることを示した点で示唆的であるが、次の点から異なる課題でさらに検討し直す必要がある。1つは、課題の性質の影響である。彼らは、先に単語を聴覚的に提示したあとで物体の絵を提示することにより、単語が絵の正しい名前であるかを判断させる検証課題を用いた。これは、先に単語を提示することで、絵の中から同定するために探索すべき特徴を限定しており、通常の認識事態とは大きく異なっている。逆に、名前を先行提示することにより、探索すべき物体の特徴空間を明らかにしており、このことから被験者が非典型的視点からの物体同定においての特定の方略を利用することを誘導したと考えることができる。一般に、日常的に物体を観察して認識するという状況においては、認識にどのような特徴が有効であるかを探索するための空間は明らかではない。もう1つは、妨害刺激(ディストラクタ)として用いた物体が、目標刺激(ターゲット)と視覚的に類似度が高いものであった点である。このことは課題において形状情報の処理に対するバイアスにつながった可能性がある。そして、Kosslynらは課題において物体の線画を利用していた。しかし、面情報の付加が視点不変性を向上させるという心理実験の結果からも(Farah, Rochlin & Klein, 1994), こうした表面特性の欠如が視点の影響を増幅した可能性がある。

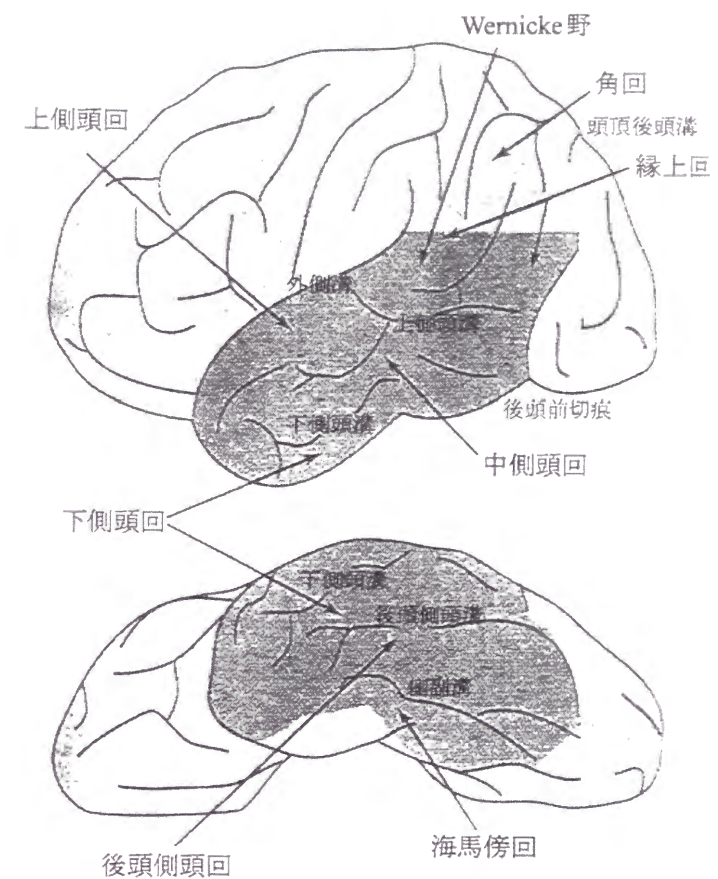


図 5.1: ヒトの脳皮質 (上: 外側面, 下: 腹側面, Farah, Humphreys & Rodman, 1999 を一部改変)。後頭側頭回の後部は紡錘状回(fusiform gyrus)と呼ばれる。

5.2 刺激実験

5.2.1 目的

本実験では、視覚的物体認識における視点不変性の問題を次の2点から検討した。1つは、物体の観察方向によって脳内の活動領域に違いがみられるかどうかであり、もう1つは、非日常的な(非典型的な)観察方向から物体を認識するときに関与している神経機構はどのような特性を持っているのかということであった。fMRIを用いた刺激実験において、被験者に対して提示される絵が何を表しているかをイメージするように教示し、顕在的な反応を求めない受動的な観察課題を用いて、物体を典型的視点から観察する場合と非典型的視点から観察する場合との脳内活動の違いに関して検討した。物体は単なる線画では

なく、現実的にモデリングされた三次元物体の二次元的な投影像を用いることで、より日常的な状況における認識を反映した課題とした。

5.2.2 方法

被験者

健康な成人男女 12 名(男性 9 名, 女性 3 名, 年齢幅 21-39 歳, 平均 29.7 歳, 全員右利き). 各被験者は十分な説明を受けた上で、実験に参加することを自らの意志により承諾した。

装置

General Electric 社製の 3 テスラの MRI 装置(GE 3T Signa)を用いて実験は行われた。磁場の不均一性の影響を受けた横緩和時間 T2*の計測をグラディエント・エコー法とスパイラル法(spiral k-space trajectory, 4 ショット)を組み合わせを行い、ナビゲーター・エコーを用いたノイズ補正を行った。それぞれのパラメータは TR = 1500 ms, TE = 30 ms, FA = 60 deg で 6 mm 厚の連続した軸状面のスライス 20 枚を 6 秒ごとに 45 回分得た。同一平面内での分解能は 3.33 mm であった(FOV = 24 cm の画像に対して、有効なマトリクス 72×72 を 128×128 に再構成)。

刺激

すべての刺激画像はコンピュータソフトウェア (DREAM 3D; Corel Corporation, Ottawa, Canada)を用いて作成された。すべての日常物体の三次元モデルに対して、2つの異なる投影画像が典型的視点と非典型的視点からそれぞれ作成された。それぞれの視点からの刺激画像例を図 5.2 に示す。そして表 5.1 に用いた刺激物体の一覧表を示す。可能な限り奥行きに関する情報を排除するために、すべての刺激はグレーレベルで白の背景に対して提示された。典型的な視点から観察したときに物体の構造情報が最も効率的に得られると考えられることから、物体の主軸が見かけ上短縮しておらず、物体を同定するために必要な特徴が隠れていないような見えが典型的景観として選択された。つまり、物体の三次元構造が最も導出しやすい景観が典型的景観として選択された。それに対して、非典型的景観は物体の主軸が見かけ上短縮している、または物体

の弁別の特徴が可視状態にないような見えが選択された。

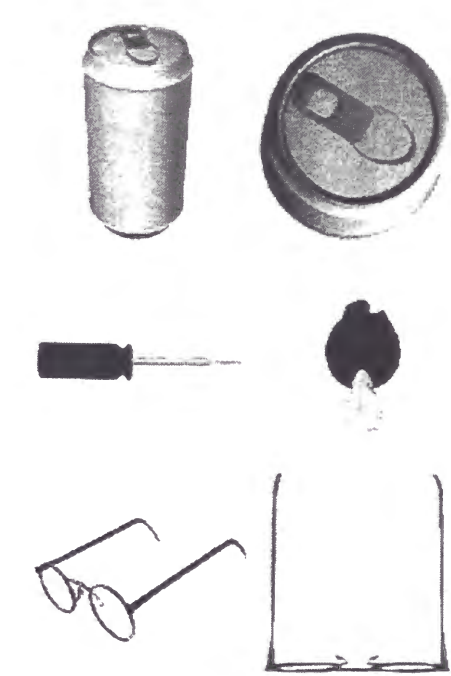


図 5.2: 実験において提示された刺激画像例

表 5.1: 実験において使用された三次元物体の一覧

飛行機	とんぼ	ヘリコプター
ビン	缶	スプレー
調味料入れ	ランプ	チャス駒
ギター	バイオリン	シャベル
シルクハット	花瓶	ベル
クリップ	ベルト	指輪
ゴルフクラブ	くまで	ほうき
ソシンガン	ドリル	トランペット
目覚し時計	ラジカセ	テーブル
りんご	レモン	いちご
ソグカップ	いす	ソルト
映写機	鉛筆削り器	OHP
トラック	自転車	車
ソタン	腕時計	タイヤ
めがね	一輪車	双眼鏡
アイロン	革靴	船
ミシン	電子レンジ	ピアノ
ナイフ	鉛筆	ドライバー

このような物体の景観の質的相違が認識パフォーマンスを大きく変化させることは先行研究において報告されている(Palmer, Rosch, & Chase, 1981)。非典型的

景観については、主軸の三次元的方位が視軸と完全に平行にはならないように配置されていた。このことは非典型的景観において認識に必要最小限の情報を提供するために重要であった。さらに、物体の意味的知識に対するアクセスが物体の典型的景観のみから可能であることを仮定すると、画像としての典型的景観と非典型的景観との間の類似度が低いことにより、非典型的視点からの認識において三次元的な物体構造により依存した処理が必要とされることが考えられる。

課題

刺激画像の提示はコンピュータを用いて制御された。刺激はプロジェクタを通して装置室内のスクリーンに投影された。被験者はあおむけに横たわった状態で頭部をパッドとベルトにより固定され、目の上方に位置している鏡によりスクリーンに投影された刺激画像を見た。刺激の大きさは視角にして約 6 度×6 度であった。

実験は典型的景観と非典型的景観の 2 つの観察条件で、順序は被験者ごとにランダムに行われた。各観察条件とも実験系列内で提示される画像はすべて典型的景観観察条件においては典型的視点から描かれた画像、非典型的景観観察条件においては非典型的視点から描かれた画像であった。両条件ともに実験はブロックデザインで行われた。1 ブロックを 30 秒として、対照条件(+印の注視点)が 30 秒間提示)と課題条件が交互に対照条件 5 回、課題条件 4 回繰り返された(合計 4 分 30 秒)。両条件ともにまず 1 秒間注視点(+)が提示されたあと、続いて提示される刺激画像が何の物体であるかを提示されている間考えつづけることが求められた。1 秒間の空白後、次の試行が始まった(図 5.3 を参照)。各ブロックにおいて 6 つの異なる刺激画像が提示され、各条件とも 54 の物体リストから被験者ごとにランダムに選択された 24 の刺激画像が全体では提示された。

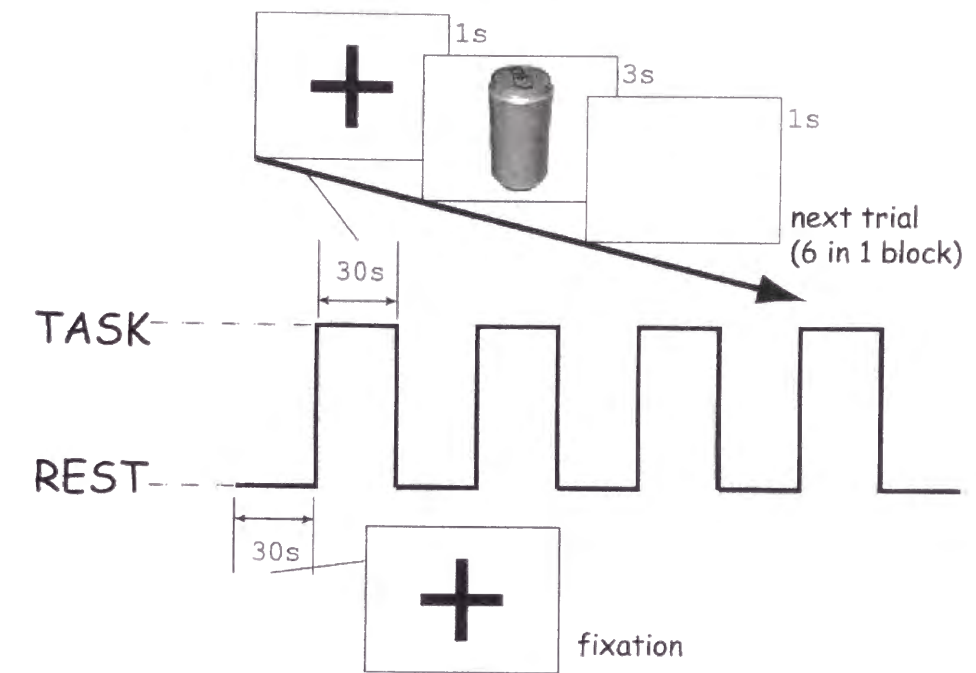


図 5.3: 実験手続き

5.2.3 統計解析

画像分析と統計的検定はすべて MATLAB (The Mathworks, Natick, MA) 上で用いることができる SPM96 (Statistical Parametric Mapping 96; Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK) により行った。まず得られた画像に対して被験者の動きによる影響を除くために空間変換補正が行われた後、被験者間の解剖的な個人差を合わせるために標準的な MNI テンプレートを用いて標準脳に対する変換を行った。この標準化は被験者全体での統計的検定や、他の研究との活動部位の比較の上で重要な処理である。そして標準化された機能画像は統計的検定を行うために 4 mm 幅の等方なガウシアンを用いて平滑化された。領域に対する条件の効果を線形対比を用いて、各ボクセルごとに t 統計量の statistical parametric map が得られた後、 Z 値に変換して $p=0.001$ の有意水準で検定を行った。そしてボクセルのクラスターの空間的な広がり的大小にしたがって $p=0.05$ で多重比較を行った。

個人ごとの分析に関しては ROI に関して、両条件間で対応のある t 検定を各 ROI の活動ボクセル数に関して行った。このように 2 通りの統計解析を行った理由としては、課題の構成上、典型的景観観察条件と非典型的観察条件との直接的な比較ができなかったために、まず最初に被験者 12 名によるグループ解析

を行うことで ROI を決定し（各条件ごとの効果）、個々の ROI に関して対応のある t 検定を行うことで、典型的景観条件と非典型的景観条件との間の活動領域の違いを検定した。

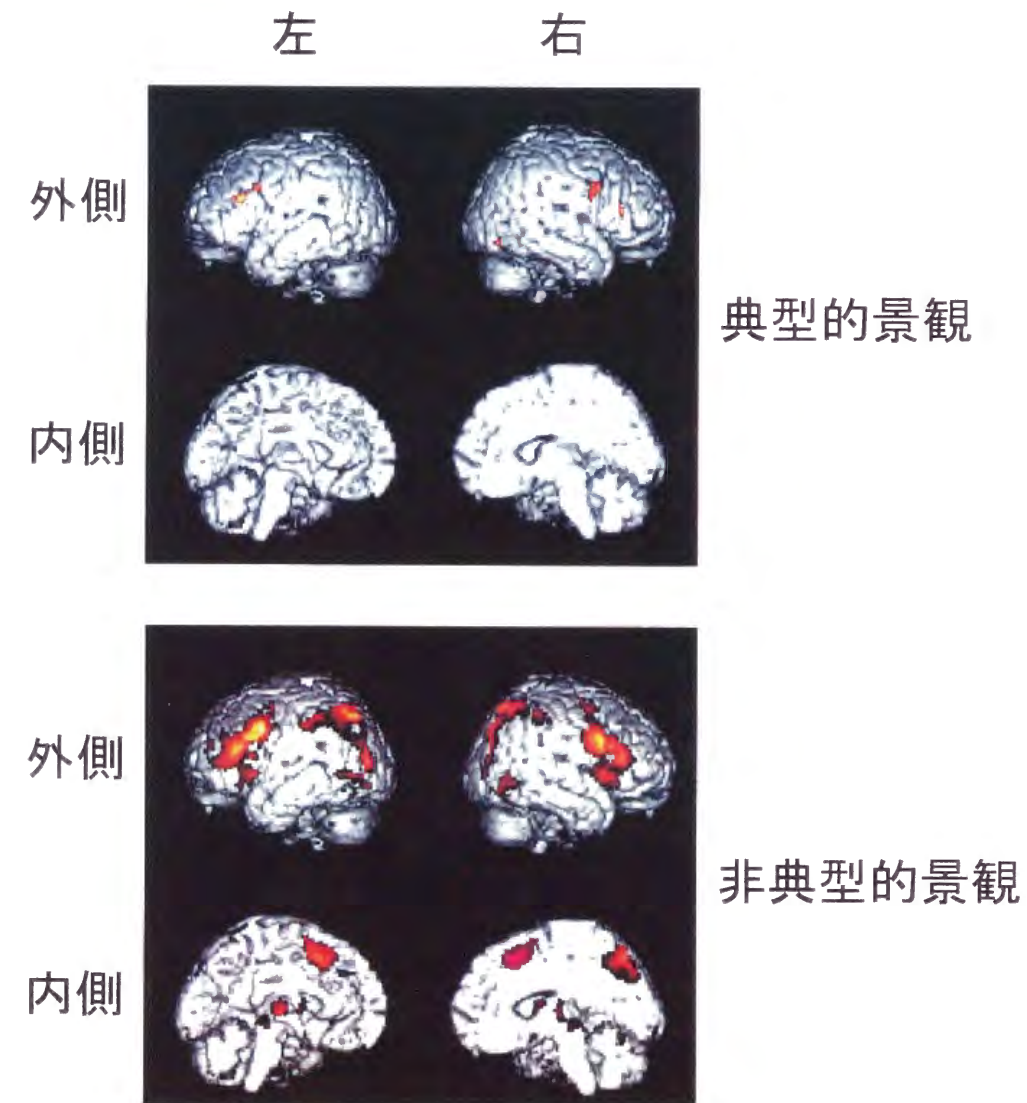


図5. 4: 両条件における活動部位 (n=12)。典型的景観観察条件は、多重比較前の活動を示している。

5. 2. 4 結果

両条件ともにグループと個人それぞれについての分析を行った。その結果、典型的景観観察条件においてはグループとしては有意な活動上昇部位は見られなかった。それに対して、非典型的景観観察条件ではいくつかの部位に関して有意な活動が見られた。図 5.4 に 12 名のデータに基づいた活動の上昇が有意であった部位についてボクセルごとに左右それぞれ外側面と内側面から見たときの図を示す。脳の広範囲に渡って非典型的景観から物体を観察しているときに活動が見られることが明らかである。さらに表 5.2 に活動部位のピークについての Talairach の座標値を示す。

個人ごとの活動部位の検定に関しては、グループの結果に基づいた ROI について活動したボクセル数(クラスターの大きさ)に関して対応のある t 検定を行った。その結果、両側の運動前野(ブロードマンの 4/6 野から 44 野)と左上頭頂小葉(7 野)の活動が非典型的景観条件において有意に大きい活動が見られた(それぞれ $t(11)=2.30, p=.042$; $t(11)=1.96, p=.076$)。さらに、右上頭頂小葉と両側の紡錘状回から下側頭回にかけての領域で非典型的景観観察条件が大きい傾向が見られた($p<.10$)。いずれの分析からも、典型的景観観察条件の方が活動が大きいことを示す部位はみられなかった。

表 5.2: 非典型的景観観察条件での代表的な活動部位のピーク座標と Z 値

活動部位	標準座標	Z 値
(前頭前野)		
右中前頭回 (BA6/9)	48,10,34	8.01
左中前頭回 (BA9)	-46,10,38	7.62
左下前頭回 (BA47)	-48,20,-4	
(運動前野)		
上前頭回内側部 (BA6)	0,10,56	5.94
右下前頭回 (BA6/44)	46,4,28	7.77
(頭頂葉)		
右上頭頂小葉 (BA7)	20,-70,56	7.90
左上頭頂小葉 (BA7)	-28,-68,54	7.31
(側頭、後頭葉)		
右紡錘状回 (BA37)	34,-64,-16	5.92

集団データと個人ごとのデータとを合わせて考えると、次の 3 つの部位において非典型的視点からの観察条件においてより強い活動が見られた。1 つは、両側の運動前野であり、これは背側部から腹側部への比較的広範囲に渡っている。次に、両側の上頭頂小葉であり、これは左の方がより強い活動が見られた。

そして両側の紡錘状回から下側頭回にかけての領域(ブロードマンの 19/37 野)であり集団データの統計解析からは、右の方がより強い活動であると考えられる。

5.2.5 考察

統計解析の結果、非典型的景観からの物体認識において後部頭頂皮質(7a 野を中心とした領域)と運動前野腹側部(6 野)から構成される脳内回路が何らかの役割を果たしていることが示唆された。後部頭頂皮質における活動は、Kosslyn et al. (1994)と一致しておりおそらく空間的な特性の符号化が関係していると考えられる。しかしながら、運動前野などの2次運動野における活動も同時に観察された点は Kosslyn らとは異なっており、非典型的視点からの認識において彼らが仮定したものとは異なる処理過程が働いていた可能性を示している。

本実験から明らかになった非典型的景観からの観察時の活動部位は、心的回転課題時のイメージング研究から得られている知見と符合している。Alivisatos & Petrides (1997)は、アルファベットや数字が標準形か鏡像形かを判断させるような心的な変換を要する空間課題(Cooper & Shepard, 1973)を行わせたとき、左の頭頂葉後部が重要な役割を果たしていることを明らかにした。彼らは PET を用いて、単にモニタ上に提示される刺激が文字か数字かを判断させる条件での脳活動に対して(統制条件)、回転していない刺激が鏡像形であるかどうかを判断させる条件(鏡像識別条件)と回転している刺激について同じように鏡像形であるかを判断させる条件(心的回転条件)での脳活動を比較した。まず両条件に共通して側頭葉後部 37 野の活動が両側で見られた。この領域はサルの TEO 野に相当し、視覚的パターンに対する形態分析を行っていると考えられている。人間においても、サルの TE 野に対応する AIT 野を切除した患者の神経心理学的研究から、リアルタイムに行う認識は AIT 野より後方に位置する領域において達成されており、AIT 野では物体に関するエピソード的情報が表現されていることが示唆される(Biederman et al., 1997)。TEO 野は TE 野と比べてより広範囲に渡って頭頂間溝付近との結合があり、視覚情報処理の腹側系と背側系との情報の伝達経路であると考えられる(Webster, Bachevalier & Ungerleider, 1994)。さらに頭頂間溝には運動前野との結合があることが明らかにされている

(Jeannerod, 1997)。頭頂間溝付近に損傷部位のある患者は視覚性運動失調と呼ばれる視覚と運動の協調障害が生じることが知られており(Perenin & Vighetto, 1988)、37 野において処理された刺激の形態的特性が実際に運動指令として変換される領域として頭頂間溝が機能している可能性を示している。Alivisatos & Petrides (1997)において運動前野の活動は見られなかったが、これは二次元的な文字という特殊なカテゴリの刺激を用いたためであると考えられる(Tagaris et al., 1997)。しかし、抽象的な図形を用いた場合でも同じように左の下頭頂葉の活動はみられており、単に視覚情報を運動指令に変換するだけではなく、より一般的な視空間的処理を行っている可能性もある。

二次元的な文字刺激と三次元的なブロック刺激を用いた研究における活動領域の比較から、本実験における非典型的景観からの物体観察条件における活動領域は、典型的な景観に対して内的に物体を回転させることにより認識を行っていることを反映していると考えられる(Cohen et al, 1996 など)。特に、上頭頂小葉に対応している 7a 野と運動前野を中心とした 6 野とが物体に対する操作を遂行するために必要な空間情報を計算するための脳内回路を構成していると考えられる。

このような説明は、物体の記憶表現に依存しないボトムアップ的な物体形状の視空間的処理に基づいた処理を仮定している。しかし、三次元的物体の心的回転に関する結果は、次の3つの理由から物体認識における主要な処理過程とは異なっている可能性がある。1つは、神経心理学的な解離を示す証拠の存在である(Farah & Hammond, 1988)。次に、ブロック物体は様々な方位において回転した形状が観察した形状の空間的情報から予測可能であり、これは一般的な物体としては極めて特殊な特性である。もう1つは、課題において2つの物体を対提示しているために、心的回転をどの方向に対してどの程度行う必要があるかが明らかである点である。これに対して、一般的な物体は自己遮蔽により可視状態にない部分が存在しており、事前知識なしには隠れた部分がどのようなになっているかは予測できない。つまり、一般的な物体を典型的ではない視点から観察した場合、物体の典型的景観を生成するための視覚情報は不十分なことが多い。このため、ボトムアップ的な物体の空間情報のみからでは、心的回転の目標となる典型的景観は得られない。

三次元物体を非典型的景観から観察したときの脳内の背側経路における活動が、心的回転のようなボトムアップ的な視空間的処理だけではなく、物体に対

する感覚運動的な経験を反映していることを支持するいくつかの証拠がある。

1 つは、サルを被験体とした神経生理学的研究(Sakata & Taira, 1994)。マカクザルの頭頂皮質における AIP 野と呼ばれる領野におけるニューロンに手指運動に関連して発火するものがあり、これらの多くが操作対象に対して高い選択性を示した。さらに、AIP 野との結合がある運動前野腹側部においてサルが実際に物体をつかんでいるときだけでなく、単にその物体を見ているだけのときにも発火することが明らかにされている。こうしたニューロンの特性は、つかむことが可能な(graspable)物体が提示されたとき、実際にそれをつかむという動作を遂行するかどうかとは無関係に運動前野が活動することを示している。

もう 1 つは、道具の使用時における脳活動を検討した研究からの知見である。道具を声に出さずに命名する課題を行わせたとき、6 野の腹側部が活動することが PET 研究から明らかにされている。Grafton et al. (1997)は、単に道具を観察する場合、道具の名前を内的に報告する場合、そして道具の使い方について内的に報告する場合の 3 条件について別々に検討することにより、運動前野の活動が道具の使い方の命名に対してより強く関与していることを示した。このことから、運動前野が運動を誘発させるような物体を処理するときに活動し、これは物体の使い方についての運動スキーマに関係した脳内活動を反映していると考えられる。

さらに、Sirigu et al. (1991)は両側の下側頭野の損傷による多様相の健忘かつ失認の患者 FB の物体認識能力について報告している。患者 FB は、物体の形状が知覚されているにもかかわらず、物体が何であるかを全く理解していない。しかし、物体の使い方といった側面に関しては述べることができた。いくつかの心理実験から、FB は知覚された物体の形状と記憶されている形状との照合をとることで判断をしているのではなく、物体の構造が機能的に矛盾していない場合に実在する物体であると判断していたことが明らかにされた。つまり、意味的知識に基づいて物体の機能を判断しているのではなく、視覚的な物体の構造的情報から物体の機能を推測することがなされていたといえる。物体をどのように使うかを身振りによって示すことが患者にとって唯一のアクセス可能な物体に関する情報であるため、物体の命名に関わる意味的情報は視覚から直接的には活性化されないが、物体に固有な操作に関する内部表現から間接的に活性化されているために、操作が明確に定義されやすい道具などの物体カテゴリに関しての物体同定能力が比較的保たれていたと考えられる。こうした症例は、

視覚的に意味的記憶に基づいて物体を同定できないときに、物体の手続き的記憶を利用することを示している点で興味深い(Riddoch & Humphreys, 1987)。本実験のように日常的物体を通常とは異なる視点から認識する場合、物体の意味的表現が典型的視点に依存しているならば、意味的表現にアクセスするには視覚情報は不十分であるために、物体をどのように操作するかという情報を補完的に利用する形で認識を行っている可能性を、脳活動のパターンは示している。

このような先行研究と合わせて考えると、非典型的視点からの物体認識にはボトムアップ的な視空間的処理とトップダウン的な感覚運動経験に基づく記憶検索的処理の 2 つが互いに補完し合う形で働いていると考えられる。こうした複数の経路の存在は、視覚情報が不十分であるような状況下でより頑健な認識を行うために有効であると考えられる。

5.3 心理実験(1)

5.3.1 目的

fMRI による刺激実験においては、物体の二次元画像を 3 秒間観察することにより、観察方向による神経機構の違いについて検討がなされた。しかし、3 秒間観察することにより、どのような情報が獲得されているかを検討するためには、心理物理的手法も合わせて検討する必要がある。プライミング実験は、次の点を検証するために行われた。1 つは、fMRI 実験において使用した物体の刺激画像に対する呼称可能性(namability)を、Kosslyn らが用いた名前検証課題と同じ実験パラダイムにより検証することであった。このことは fMRI 実験において使用した物体の刺激画像について、非典型的な視点から観察した画像からの認識成績が極端に低いことによって、脳活動の違いがみられたかどうかを検討するために必要である。さらに、物体の刺激画像をある視点から観察することにより、潜在的にどのような情報が活性化されているかを検討することがプライミング課題を用いることにより可能となる。実験では、最初に学習段階において物体を典型的景観か非典型的景観のいずれかの視点から提示し呼称課題を行った。その後干渉課題をはさんで、瞬間的に提示される物体画像と直後に提示される名前とが正しい組み合わせであるかどうかの判断を行った。このとき提示される刺激画像は、学習段階において同じ視点から提示された場合と

異なる視点から提示された場合、そしてテスト段階で初めて提示された場合のいずれかであった。このテスト段階での、名前検証課題での遂行成績(正答率および正答反応の反応時間)を学習段階での提示の有無および提示された視点に関して比較することにより、物体の観察視点により自動的に処理される情報の違いが明らかになると考えられる。

5.3.2 方法

被験者

京都大学大学院生 11 名。11 名すべて fMRI 実験には参加していなかった。

刺激材料および実験装置

刺激材料は、fMRI 実験において使用したのと同じ日常的な物体画像 108 枚(物体の種類 54、各物体について典型的景観と非典型的景観からの 2 枚の画像)。実験装置は制御用に VSG2/3 ボード (Cambridge Research Systems Ltd., Rochester) を装着した富士通製の FMV-DESKPOWER SP、提示用に EIZO 製の E75-F(21 in.)を用いた。

手続き

被験者には、画面中央に日常的によく見るような物体を描いた絵が 1 枚ずつ 3 秒間提示された。絵が消えた後で、被験者は提示された絵が表している物体の名前を言うように求められた。名前を言った後で、被験者はマウスをクリックして次の絵が提示された。呼称時には、可能なかぎりその物体の基本レベルでの名前を言うように求められた。刺激画像は典型的景観が 14 枚、非典型的景観が 14 枚で、学習段階の試行数は 28 であった。

呼称課題後、5 分間の干渉課題が行われた。被験者は、渡された用紙に制限時間内に思いつく限り、県名とその県庁所在地を対にして書き出すように求められた。その直後に、プライミング課題として名前検証課題が行われた。

注視点(+)が提示された後、物体を描いた絵が画面中央に提示された(50 ms)。その後、パターンマスク画像とその上部に名前が提示され、被験者は瞬間提示された絵と名前が一致するかどうかをマウスをクリックすることにより反応した。刺激画像が提示されてから、マウスのクリックまでを反応時間として測定

した。学習段階での試行数は、提示刺激画像の視点(同じ、異なる、未学習)×テスト段階での提示刺激画像(典型的景観、非典型的景観)の 6 条件で各条件 14 試行ずつ計 84 試行と 2 つの画像を重ね合わせた後、ほかすことによって作成されたフィラー試行 10 の合わせて 94 試行であった。

5.3.3 結果

正答率として、ヒットとコレクトリジェクション(correct rejection; 正棄却)の全テスト試行における比率、そして反応時間として、正反応(ヒット)に関する中央値を各被験者ごとに算出し、正答率と反応時間の中央値それぞれについて被験者 11 名での平均値を求めた。表 5.3 に条件ごとの(6 条件)被験者 11 名の正答率と正反応の反応時間の中央値の平均値を示す。

表 5.3: 実験条件ごとの被験者間の正答率と正反応反応時間の中央値の平均

実験条件	正反応反応時間 (ms)	正答率 (%)
同	典型的	815
	非典型的	927
異	典型的	929
	非典型的	810
統制	典型的	891
	非典型的	990

被験者 11 名の正答率に関して、学習段階での刺激画像の提示方位(同じ、異なる、未学習)の 3 水準とテスト段階での刺激画像の提示方位の 2 水準との 3×2 の被験者内 2 要因計画の反復測定分散分析を行った (図 5.5)。その結果、両要因の交互作用が有意、そして学習段階での方位が有意傾向にあった ($F(2,20)=6.30$, $MSe=.007$, $p=.007$; $F(2,20)=3.37$, $MSe=.020$, $p=.055$)。

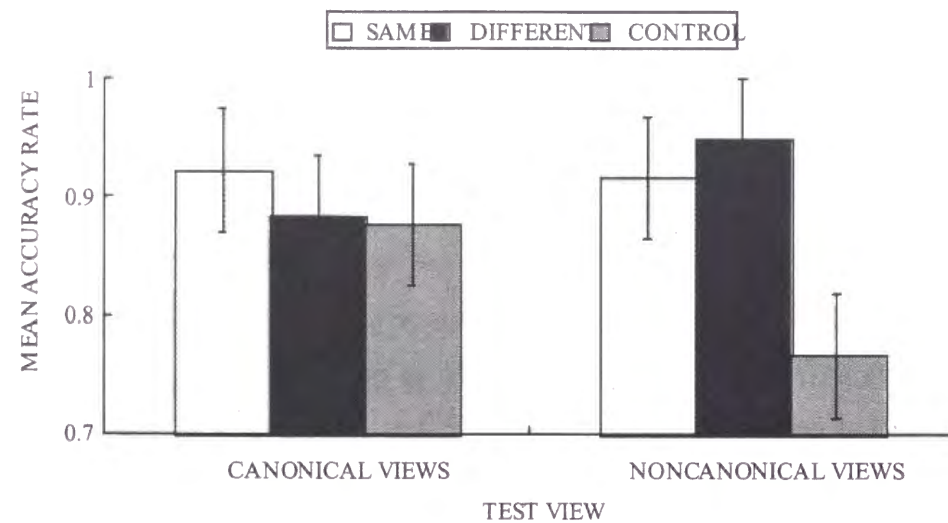


図 5.5: 実験条件ごとの正答率。エラーバーは Loftus & Masson (1994)による被験者内誤差を示す。

そして水準間の差を検討するために、シェッフェの方法による事後検定を行った。その結果、統制(未学習)条件での非典型的景観と、同条件での典型的景観($p=.012$)、非典型的景観($p=.017$)、そして異条件での非典型的景観($p=.003$)との3つの組み合わせの間に有意な差がみられた。

被験者 11 名の正反応の反応時間の中央値に関して、学習段階での刺激画像の提示方位(同じ, 異なる, 未学習)の 3 水準とテスト段階での刺激画像の提示方位の 2 水準との 3×2 の被験者内 2 要因計画の反復測定分散分析を行った(図 5.6)。その結果、学習時の方位とテスト時の方位、そして交互作用すべてが有意であった ($F(2,20)=5.57$, $MSe=6487.5$, $p=.012$; $F(1,10)=11.59$, $MSe=1367.9$, $p=.007$; $F(2,20)=23.46$, $MSe=3951.5$, $p=.000$)。

交互作用に関して、水準間の差を検討するために、シェッフェの方法による事後検定を行った。特に、学習段階では提示されなかった統制条件と学習段階で提示された条件との対比により、プライミングがどの程度生じていたかが明らかになる。その結果、異条件で非典型的景観条件の時にのみ有意なプライミングが生じていた(180 ms, $p=.000$)。

5.3.4 考察

正答率と反応時間の分析結果から、次の点が明らかにされた。まず、テスト段階での未学習物体に対する正答率が典型的景観が 87.7%, 非典型的景観が 76.6%で事後検定から有意差はみられなかったのに対して、正反応の反応時間からは有意な差がみられた(典型的景観 891 ms, 非典型的景観 990 ms, $p=.047$)。正答率が相対的に低い条件で、より反応時間が長くなっていることから、速さと正確さとのトレードオフは生じていなかったといえる。そしてこのことは、非典型的景観からの名前などへの言語的な意味知識の呼出しが、典型的景観からの場合と比較して有意に成功しなかったわけではなく、何らかの別の処理モジュールが関与することにより(約 100 ms の時間を要する)名前情報を呼出していることを示唆している。

次に、テスト段階での提示される景観が非典型的である場合、学習段階で提示された景観が同じであるか異なっているかに関わらず、正答率が大きく上昇した。典型的景観の条件では、未学習物体であっても正答率が約 90%に達しているために、天井効果のために正答率の上昇が有意には観察されなかった可能性を考えると、この学習効果は必ずしも非典型的景観条件にかぎったものではない。

最も重要な点として、反応時間の条件間の比較から、典型的景観から物体を観察したときに、非典型的景観からの名前検証課題での反応時間の促進が見られたことがある。その他の条件では、有意なプライミング効果はみられなかった。以上の点から、典型的景観と非典型的景観からの認識過程について、名前情報を含んだ物体の意味的知識の呼び出しの容易さと、知識を呼び出した後の物体情報の活性化に違いが存在していると考えられる。まず、非典型的景観からの認識は約 100 ms, 典型的景観からの場合と比較して遅かった。このことは fMRI 実験の結果から推察されるように、非典型的景観からの認識においてその構造からの動作的知識の検索などのプロセスが関与していることを示している可能性がある。もう 1 点として、典型的景観から物体を学習した後で、非典型的景観からの課題の遂行成績が促進されたにもかかわらず、逆に非典型的景観から物体を学習することによる典型的景観における促進効果は観察されなかった。このことは、典型的景観と非典型的景観とでは活性化される物体の記憶情報が異なっていることを示唆していると考えられる。

こうしたプライミングの結果が、学習段階の物体呼称課題における成績を単に反映している可能性がある。つまり、非典型的景観において学習した場合、そもそもその物体に関する意味的知識が全く呼び出されなかったために非典型的景観の学習による、典型的景観でのプライミングが見られなかった可能性がある。この点について検討するために、学習段階での呼称で誤反応だった物体に関して名前検証課題での分析から除外した。学習段階の呼称課題での誤反応は、典型的景観では 11%，非典型的景観では 42% みられた。名前検証課題での結果をあらためて分析した結果、反応時間について同様の傾向がみられた。このことは、非典型的景観からその物体が何であるかを正しく理解することが可能であった場合でも、典型的景観から観察した場合と比較して反応を促進させなかったことを示している (815 ms - 929 ms, $p=.018$)。

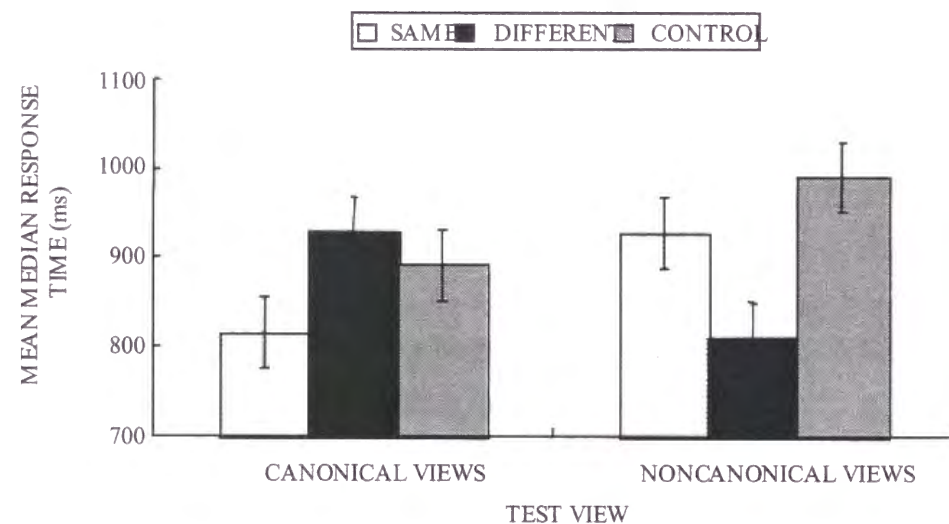


図 5.6: 実験条件ごとの正答反応時間。エラーバーは Loftus & Masson (1994) による被験者内誤差を示す。

結果として、正反応の反応時間からプライミングが典型的景観が学習段階で提示されたときのみにみられることが明らかにされた。Cooper と Schacter (1992) は、三次元的なブロック物体の線画を用いた物体判断課題(物体が実際に三次元的に存在することが可能かどうか)から、可能物体に関してのみプライミング効果がみられることを示した。彼らはこの結果から、物体の構造記述を生成することがプライミングの生起に重要であると主張した。典型的景観において、その三次元的な構造記述が一意に定めることが可能であるために、反応が促進さ

れたと考えられる。それに対して、非典型的景観から物体を観察した場合には、その構造記述は一意に定まらないことが多いために、構造記述の候補間での競合が生じることにより反応時間が遅くなると考えられる。

プライミング実験の結果は、典型的景観と非典型的景観から物体の名前を呼ぶという課題を行ったときに、その構造記述を生成するメカニズムの違いを反映していると考えられる。そして、正答率に関して有意な差がなかったことから、非典型的景観からも物体の名前についての意味的知識を呼び出すことは可能であることが明らかになった。しかし、物体の意味的知識が、個々の物体に関して弁別的な表現であるならば、構造記述と意味的知識との結びつきが一意に定まらない場合であっても、その物体が提示されたかどうかに関する再認判断は可能であると考えられる。こうした物体の典型性効果の潜在記憶と顕在記憶との間での解離について、再認記憶実験を行うことで検討した。

5.4 心理実験 (2)

5.4.1 目的

本実験は、実験 1 と同様に、物体画像を 3 秒間観察することで、どのような情報が学習されるかを再認記憶実験から明らかにすることを目的とする。再認記憶課題は、物体呼称課題と再認課題との 2 つの課題から構成された。まず最初に被験者は物体呼称課題を行った後、5 分間の干渉課題(5 分の時間制限の中で、思いつく限り世界の国名とその首都を対にして書き出す)を行った。その後で、CRT 画面中央に提示される絵刺激が、呼称課題において提示された物体であるかどうかの再認判断を行った。

5.4.2 方法

被験者

京都大学大学院生 7 名。7 名ともに fMRI 実験、プライミング実験には参加していなかった。

刺激材料および実験装置

刺激材料は、fMRI 実験およびプライミング実験において使用したのと同じ日常的な物体画像 108 枚(物体の種類 54, 各物体について典型的景観と非典型的景観からの 2 枚の画像)。実験装置はプライミング実験と同様の装置が用いられた。

手続き

学習段階では、まず最初に CRT 画面中央に物体の刺激画像が 3 秒間提示された。物体の刺激画像は典型的景観か非典型的景観のいずれかで提示された。被験者は 3 秒間の提示後、マウスをクリックしてその刺激画像が表している物体の名前を実験者に報告した。報告後、マウスを再びクリックすることにより、次の試行へと移った。刺激リストから、すべて異なる物体が 24 個ランダムに選択され、それぞれ 12 枚ずつ典型的景観からの画像と非典型的景観からの画像として提示された。被験者には、学習段階において提示された刺激画像を後のテスト段階のために記憶するようには教示されなかった。

学習段階後、被験者は 5 分間の干渉課題を行った。被験者は 5 分間の間、渡された用紙に思いつく限り、世界の国名(正式名称である必要はなかった)およびその首都名を書き出すように求められた。干渉課題の終了後、すぐにテスト段階についての教示がなされ、再認記憶課題を行った。

再認記憶課題では、注視点(+)の提示(500 ms)後に、CRT 画面中央にテスト画像が瞬間提示された後(50 ms)、マスク画像が提示され、被験者は瞬間提示された画像が表している物体が、その提示された景観に関わらず物体呼称課題において提示された物体であったかどうかをマウスをクリックすることにより反応した。この時、被験者はできるだけ正確にかつ速く反応を行うことを求められた。ターゲットが 24、ディストラクタが 24、そして 2 枚の画像を組み合わせればかすことによって作成されたフィラー刺激を 10 枚の計 58 試行が行われた。

5.4.3 結果

被験者ごとに、ヒットとコレクトリジェクションから正答率と正反応についての反応時間の中央値を算出した。学習段階での物体の提示方位(同じ、異なる、未学習)とテスト段階での提示方位(典型的、非典型的)の要因に関して、被験者内 2 要因計画の反復測定分散分析を正答率と反応時間についてそれぞれ行った。

その結果、反応時間に関して学習段階での提示方位の要因のみが有意であった(図 5.7, $F(2,12)=9.49$, $MSe=87393.9$, $p=.003$)。シェッフェの方法による事後検定から、テスト刺激が未学習の物体の場合のみが、他の 2 水準(学習時とテスト時が同じ方位、または異なる方位)と比較して有意に差がみられた($p=.008$, $p=.010$)。

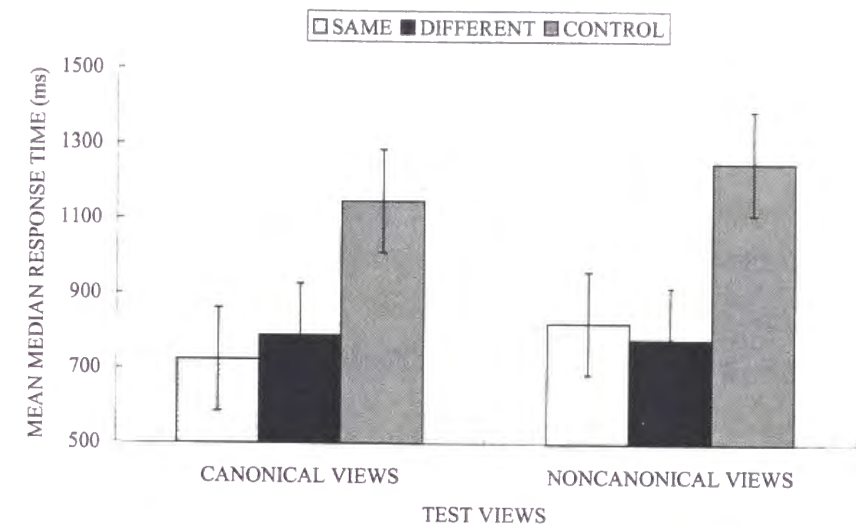


図 5.7: 実験条件ごとの正答反応時間。エラーバーは Loftus & Masson (1994) による被験者内誤差を示す。

5.4.4 考察

プライミング実験と再認記憶実験の結果から、典型性効果が名前照合課題においてのみみられることが明らかになった。まず、再認記憶課題では典型性の影響がみられなかったことは、その物体が何であるかに関する意味的知識を呼び出すことにより、その物体の任意の景観から再認判断が可能であることを示している。しかし、非典型的景観からの学習により、別の非典型的景観での再認成績がどう変化するかを検討していないため、単に典型的景観が意味的知識が表す物体のプロトタイプ的な見え方として保持されているだけの可能性がある。いずれにしても、意味的知識から物体の典型的な見え方についての視覚的知識を呼び出すことは可能であり、プライミング課題での結果が単に意味的知識だけの関与を示すものではないことを示唆している。

このように名前照合課題において、典型的景観の学習により、非典型的景観からの反応の促進が見られたのに対して、逆はみられなかったことは、典型的

景観から物体を観察することにより，非典型的景観からの認識に関わる処理過程の一部が促進されることを反映していると考えられる．

fMRI による脳活動と心理実験の結果を合わせて考えると，上頭頂小葉と運動前野腹側部の活動はいずれも意味的知識をは独立した空間構造に関する処理を反映したものであるといえる．しかし，両者はそれぞれ視空間的処理のボトムアップ的側面とトップダウン的側面を反映しており，両処理過程が互いに補い合うことで非典型的景観からの認識を達成していると考えられる．

第 6 章 総合的考察

本論文は，視覚的物体認識における視点不変性の問題に対して，心理学的，および fMRI を用いた神経機能画像法的研究を通して得られた結果をまとめたものである．以下に各章における概要を述べる．

第 2 章では，変換が適用された図形が，どのような心理的次元に基づいて符号化されるかが，類似性判断課題により検討された．図形間の主観的類似度は，図形の形状が表現されている空間の特性を最もよく反映している．そのため，類似性判断課題により，形状のどのような特性が符号化されているかを明らかにすることができる．その結果，形状を大局的な構造記述に基づいて符号化した次元と，形状に対してどのような変換がなされていたかを示す情報を符号化した次元に独立して，形状が知覚されていることが明らかにされた．このように，人間は物体形状を視点に不変な形で知覚するために，物体固有の特性(形状 - 同定情報)と，観察条件による観察者に対しての物体の姿勢(方位 - 変換情報)とを独立に知覚している．このことは，人間が同定に必要とされる意味的知識とは独立に，物体の可能な構造に関する知識をあらかじめ内部に持っていることを示唆している．

第 3 章と第 4 章では，第 2 章において明らかにされた形状空間において，表現されているプロトタイプの形状の符号化に対する方位 - 変換情報の影響について検討した．まず，第 3 章では，傾いた図形を記憶するときに，同じ構造的性質を持つような図形との識別力が，学習方位と構造的に正立な方位の両方において低下することが，再認記憶課題から明らかになった．この結果は，傾いた図形を学習する時に，構造的知識を利用することで，自動的に構造的に正立な形状が内的に生成されたことを示唆している．このように，共通した特徴を一定の規則に基づいて配置した図形集合を用いた時，特徴間の形状内での空間関係を反映した構造記述が，他の形状との識別に最も有効な情報となっている(形状 - 同定情報)．それに対して，特徴の形状内での典型的な位置が，観察された位置からどの程度逸脱しているかが，物体が観察者に対してどのような向きに変換されているかを判断するために有効な情報(方位 - 変換情報)となっている．これらの物体表現の基礎となる特徴の 2 通りの空間関係は，形状 - 同定情報が自己とは無関係の外部世界のみに基づいた空間関係であることから他者

中心的な(allocentric)空間関係, 方位-変換情報が自分自身に対する空間関係であることから自己中心的な(egocentric)空間関係と呼ぶことができる. さらに, 神経心理学的研究から, これらの空間関係が独立した神経基盤を持っていることが明らかになっている(Goodale & Humphrey, 1998; Murphy, Carey, & Goodale, 1998).

第4章では, 方位-変換情報に依存して, 形状の構造記述に対する感度に変化することが, 再認記憶課題から明らかにされた. まず知覚形状が, 構造的に正立な方位であると判断される場合は, 形状が全体として符号化されていた. それに対して, 形状が構造的に傾いていると判断される場合は, 特徴間の明示的な空間関係に基づいた構造記述的表現が生成された. この結果は, 視点不変性のメカニズムの解明にとって, 重要な意味を持っている. 一般に, 2つの異なる(単純なピクセル値の相関測度では一致しているとみなすことができない)視覚画像が提示されたとき, 物体そのものが異なるために画像が異なって見えるのか(他者中心的な空間関係の変化), それとも観察視点の方向と位置が異なるために画像が異なって見えるのか(自己中心的な空間関係の変化)かは事前には明らかではない. 第4章の結果は, 自己中心的な空間関係(方位-変換情報)を手がかりとして, 異なる視覚画像間の連合関係を形成するために必要な構造的情報が利用されていることを反映していると考えられる.

第5章では, fMRIにより脳活動を計測することにより, 物体認識に対する観察視点の典型性の影響を検討した. 日常的に見慣れた物体について, その三次元構造に最もアクセスしやすい景観(典型的景観)と, 物体の主軸が奥行き方向に短縮していたり, 物体の弁別の特徴が遮蔽することにより, 三次元構造が把握しにくい景観(非典型的景観)とを提示した場合での脳活動の違いが計測された. その結果, 非典型的景観から物体を認識するときには, 上頭頂小葉を中心とした後部頭頂皮質と運動前野腹側部とから構成される脳内ネットワークが関与していることが明らかにされた. サルを用いた神経生理学的知見と脳損傷患者に対する神経心理学的症例などから, これらの脳内領域は, それぞれ視空間的处理と, 物体をどのように操作するかという感覚運動的経験の利用を反映していると考えられる. このように, 非典型的景観から物体を観察するとき, 意味的知識とは独立した物体の空間構造に関する処理が行われていることが示された. さらに, プライミング実験の結果は, 非典型的景観からの名前検証課題における処理時間が, 先に典型的景観から学習がなされていた場合にの

み減少することを示していた. このことは, 典型的景観から学習がなされることで, 非典型的景観から観察したときに生じている空間構造の多義性が解消されたことを反映している.

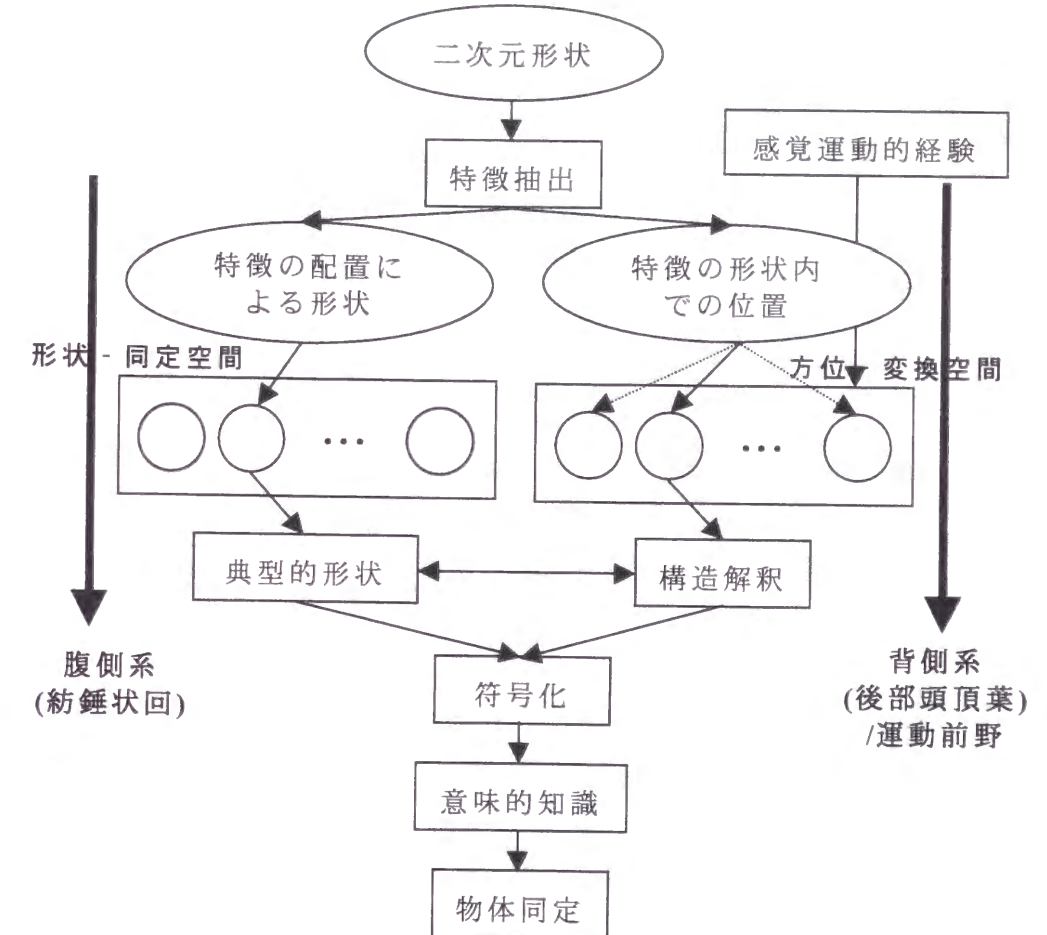


図 6.1: 視点不変性に関わる脳内メカニズムの図式

図 6.1 は, 第2章から第5章までの心理実験, および fMRI を用いた刺激実験の結果に基づいて構成された, 視点不変性に関わる脳内メカニズムの図式である. 一般に, 両眼視差やテクスチャ, そして陰影情報が存在しない場合, 二次元的な網膜像に対する三次元的な解釈はほぼ無数にありうる. 本論文における一連の結果は, 人間の認識系が, この網膜像に対する三次元的解釈のあいまいさを解消するために, 形状クラスごとに定義されるような弁別の特徴の形状内での位置の事前確率に基づいて方位-変換情報を推定することにより, 形状の三次元的解釈にバイアスをかけていることを示してきた. 認識系は, 三次元的解釈のあいまいさを解消することにより, 結果として視点変化に対して不変な認識を達成していると考えられる. この時, 第2章において明らかにされた方

位 - 変換情報を次元として張られた表現空間は、物体の見かけの形が、様々な変換パラメータによってどのように変化を表現しており、どのような構造の連続的变化が、視点の変化に対して知覚されるかに関する事前知識としての性質を持っていた。このような知識は個々の物体の意味的知識とは独立したものであり、人間がこうした構造的知識を利用することで、非典型的景観からの認識を効率的に行っていることを示している。

さらに、第 5 章における fMRI 実験とプライミング実験の結果は、典型的景観から物体を観察したとき、三次元的な物体構造と意味的知識との間の連合関係が活性化されることにより、三次元的な物体構造の解釈のあいまいさが解消されたことを示していた。図 6.1 に示したように、視覚的物体認識においては、少なくとも 2 つの経路が関与していると考えられる。1 つは、直接に意味的知識にアクセスしている経路（腹側系）である。もう 1 つは、あらかじめ記憶内に貯蔵されている構造に関する様々な物体構造の候補から、知覚形状を最もよく説明することができる構造を選択することで、典型的形状を導出した後で、意味的知識にアクセスしている経路（背側系）である。このように、意味的知識とは独立した構造的知識（＝可能な構造の候補）を表現している空間が、第 2 章で明らかにされた方位 - 変換空間に対応している。それぞれの構造記述の候補に対してその生起確率が学習されており、視空間的処理によって獲得された特徴の観察者に対しての空間的特性や、検索された物体の使い方に関する知識等に基づいて、最も妥当な構造が選択されるようになると考えられる。第 5 章のプライミング実験の結果は、その構造に関するあいまいさが典型的景観から学習を行うことにより解消されたことを反映していたと考えられる。

このように、典型的景観が、紡錘状回を中心とした腹側系において、画像的な般化に基づいて照合を行うことにより認識が達成されているのに対して、非典型的景観では、後部頭頂皮質を中心とした背側系や運動前野において、機能的に矛盾のない形で構造的記述を生成することにより、認識系は視点変化に影響されない認識を達成していると考えられる。こうした枠組は、典型的景観が正立方位において観察される物体形状であり、意味的知識と直接に連合しているという前提のもとに成立している (Palmer, Rosch & Chase, 1981)。形状 - 同定空間は、こうした典型的景観における物体形状が表現されたものであると考えられる。

これまでも、物体認識に複数の処理過程が関与しているという考え方は多数

存在してきた。しかし、そのほとんどは形状処理の異なる側面、具体的には、局所的処理と大局的処理の違いに着目したものに過ぎなかった。両処理とも腹側系の活動を反映しており、これまで認識における背側系の関与や経路間の相互作用についての検討はあまりなされてこなかった。それに対して、本研究では物体の方位などの空間特性が、物体の形状からの同定判断に影響していることを実験的に明らかにした。物体形状に対して、腹側系の処理とそれを制約している背側系の処理といった少なくとも 2 通りの異なる処理がなされることにより、頑健かつ効率的に視覚的物体認識が達成されていると考えられる。

このように本論文では、視覚物体認識に関わる形状の脳内表現が、観察者とは独立した形態特性と観察者に依存した空間特性との 2 通りの特性に基づいて形成されているという立場を一貫してとってきた。方位などの観察者に依存した空間特性を、視点不変性を達成する上で排除すべき要因としてみなすのではなく、視点変化に対して不変な物体の構造記述を導出するために積極的な役割を果たしているものであるという点を、心理実験と fMRI による生理実験により明らかにしてきた。つまり、何であるか分からない物体を見ている時、物体の見慣れた部分から、最もその見えを生成した可能性が高い構造を推測する処理過程が関与していることにより、視点不変性が達成されていると考えられる。このような処理過程は、見えと構造との関係が 1 対 1 ではなく、多対 1 の関係であるために、機能的にはカテゴリー化と等しい (Warrington & James, 1986)。この時、特徴が典型的な形状内でどのような空間位置にくるかは、カテゴリー化を行うための重要な手がかりとなっている。

興味深い点として、脳活動の非侵襲的計測から、非典型的景観からの認識に関与している処理過程が、脳内の後部頭頂皮質および運動前野腹側部において行われている可能性が示唆された。これらの領域の活動は、メンタルローテーション的な視空間的処理と運動スキーマの活性化を反映していると考えられるが、いずれも動作的知識を用いて非典型的景観からの認識がなされていることを反映している。視覚系とは異なり、触 - 運動系により受容される情報は少なくとも視点変化に対して安定して知覚することが可能であり、発達のにも物体知覚の恒常性の成立に深く関与している可能性がある。例えば、よく知られているアクティブタッチ (Gibson, 1962) などの現象も、物体の形態知覚における触 - 運動系の関与を示すものであり、この点に関しては物体そのものの概念獲得の問題と合わせて今後さらに検討していく必要がある。

本研究において残された課題の1つに、知覚形状に対して方位を決定するために必要なカテゴリー的知識を、人間がどのようにして獲得しているのかという問題がある。方位 - 変換空間において表現されている情報は、外部世界における物体の構造に関する事前知識に対応していると考えられる。人間がこうした事前知識をどのようにして獲得しているかを明らかにしていくことは、本研究の枠組において残された重要な問題の1つである。例えば、人間はたった1つのパターンからだけでも、容易にそのパターンと同じカテゴリーに含まれると推測される別のパターンを生成することができる(Feldman, 1997)。このことは、知覚的なカテゴリー化が、常に何らかの潜在的制約を受けていることを示している。Feldman(1997)は、こうした現象を踏まえて、物体に対してどのような変換的操作が適用可能であるかの認知が、知覚的なカテゴリーの本質であると主張している。本研究において、被験者は図 2.3(p.18)に示したような図形を観察したときに、最初に上下方向に関する情報を与えている主軸に基づいて、図形の形状表現を形成していくと考えられる。形成された表現においては、主軸に対するその他の線分特徴の位置の変化を、許容される操作であるとみなすことにより、同じ知覚的なカテゴリーに含まれる図形を多数内的に生成することができる。このようなカテゴリー的に許容される変換的操作の存在を仮定することで、被験者がなぜ1つの図形からカテゴリー的知識を利用することが可能であったのかを説明することができる。計算論的には、この問題は教師なし学習と呼ばれ、どのようにして一般的な知識が賞罰なしに獲得できるのかという問題として扱われている(Barlow, 1989)。例えば、網膜像をマトリクスで表したとき、特定の位置にある特徴がくる事象が刺激の方位、そしてマトリクス内の任意の2つの位置に2つの特徴の組み合わせがくる事象が刺激の同定を意味するという制約だけから物体画像の学習を行わせた場合、どのような表現が獲得されるかは大変興味深い。今後、この問題をさらに深く検討していくことが必要であると考えられる。

最後に、Marrによる物体認識の計算理論との関係を考察することで、本論を締めくくりたい。本論文を通して扱ってきた視点不変性の問題は、1つの物体に対して複数の見えが存在していることから、カテゴリー化の問題として捉え直すことが出来た。この知覚的なカテゴリー化に関わる処理過程は、Marrの理論においては、2.5D スケッチから3D モデルを再構成するという計算過程に対応している。それに対して、本論文では、少なくとも知覚的なカテゴリー化に関与

している処理過程の1つとして、あらかじめ脳内に獲得されている様々な三次元構造の候補の中から、知覚された物体の形状を最もよく説明することが可能なものを、形状内の弁別的特徴の位置に基づいて選択するという処理過程が存在することを明らかにした。こうした複数の処理過程が、同じ視覚的物体認識を行うことを目的として同時に存在していることは、決して不自然なことではない。生物にとって、認識は環境に適応するために最も有効な認知的機能であり、必然的に頑健で効率的なメカニズムによって担われていると考えられる。そのために、様々な環境の条件下で常に頑健にかつ効率的に物体を認識するためには、デフォルトの処理過程以外に、様々なオプションな処理過程が存在していると考えられる。つまり、常にあらゆる観察状況で1つのアルゴリズムに基づいた認識を行うよりも、多くの場合で上手く働くような自動化されたデフォルトの処理過程を用意しておき、例外的状況に対応可能なオプションな処理過程が補助的に働いている方が、より頑健で効率的な認知的機能を実現することができるといえる。

筆者は、こうした人間を含めた生物の知的行動の基盤となる物体認識機能は、本研究において用いた心理学的、神経機能画像法的手法だけではなく、多様な手法によりさらに検討していくべき重要なテーマであると信じている。

謝辞

本論文を執筆するにあたり、御指導をいただいた京都大学大学院情報学研究科の乾敏郎教授および斎木潤助教授，そして修士課程在籍時に御指導いただいた京都大学大学院文学研究科の清水御代明元教授，苅阪直行教授，藤田和生教授に感謝致します。特に，本論文はすべて乾教授との共同研究からまとめられたものである。乾教授には，筆者が4回生時から研究に対する基本的な取り組み方から心理実験および高次脳機能における生理学的知識を含めて多くのことを教えていただきました。ここに深く感謝致します。

本論文の第5章における機能的MRIを用いた刺激実験は，筆者が電子技術総合研究所において実習生として滞在中に行われたものである。このような機会を与えてくださった中井敏晴医用ビジョンラボ・ラボリーダー，そして松尾香弥子研究員に感謝致します。中井敏晴ラボリーダーには英語論文の執筆に際しても御指導をいただき，ここに深く感謝したいと思います。また，本論文における研究は第3章以外すべて日本学術振興会から補助を受けた。ここに感謝します。最後に妻康代に感謝します。

参考文献

- (1) Alivisatos, B., & Petrides, M. (1997). Functional activation of the human brain during mental rotation. *Neuropsychologia*, 35(2), 111-118.
- (2) Barlow, H. B. (1989). Unsupervised learning. *Neural Computation*, 1(3), 295-311.
- (3) Biederman, I. (1987). Recognition by components: a theory of human image understanding. *Psychological Review*, 94, 115-145.
- (4) Biederman, I., & Gerhardstein, P. C. (1993). Recognizing depth-rotated objects: Evidence for three-dimensional viewpoint invariance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19, 1162-1182.
- (5) Biederman, I., Gerhardstein, P. C., Cooper, E. E., & Nelson, C. A. (1997). High level object recognition without an anterior inferior temporal lobe. *Neuropsychologia*, 35(3), 271-287.
- (6) Biederman, I., Subramaniam, S., Bar, M., Kalocsai, P., & Fiser, J. (1999). Subordinate-level object classification reexamined. *Psychological Research*, 62, 131-153.
- (7) Bricolo, E., Poggio, T., & Logothetis, N. K. (1997). 3D object recognition: A model of view-tuned neurons. In M. C. Mozer, M. I. Jordan, & T. Petsche (Eds.), *Advances in Neural Information Processing Systems 9* (pp. 41-47). Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- (8) Bülthoff, H. H., & Edelman, S. (1992). Psychophysical support for a two-dimensional view interpolation theory of object recognition. *Proceedings of the National Academy of Science USA*, 89, 60-64.
- (9) Cohen, M. S., Kosslyn, S. M., Breiter, H. C., DiGirolamo, G. J., Thompson, W. L., Anderson, A. K., Brookheimer, S. Y., Rosen, B. R., & Belliveau, J. W. (1996). Changes in cortical activity during mental rotation: A mapping study using functional MRI. *Brain*, 119, 89-100.

- (10) Colby, C. L., Duhamel, J.-R., & Goldberg, M. E. (1993). Ventral intraparietal area of the macaque: Anatomic location and visual response properties. *Journal of Neurophysiology*, 69, 902-914.
- (11) Cooper, L. A., & Schacter, D. L. (1992). Dissociations between structural and episodic representations of visual objects. *Current Directions in Psychological Science*, 1, 141-145.
- (12) Cooper, L. A., & Shepard, R. N. (1973). Chronometric studies of the rotation of mental images. In W. G. Chase (Ed.), *Visual information processing* (pp. 75-176). New York: Academic Press.
- (13) Corballis, M. C. (1988). Recognition of disoriented shapes. *Psychological Review*, 95, 115-123.
- (14) Cutzu, F., & Edelman, S. (1994). Canonical views in object representation and recognition. *Vision Research*, 34, 3037-3056.
- (15) Cutzu, F., & Edelman, S. (1998). Representation of object similarity in human vision: Psychophysics and a computational model. *Vision Research*, 38, 2229-2257.
- (16) Davidoff, J., & Warrington, E. K. (1999). The bare bones of object recognition: implications from a case of object recognition impairment. *Neuropsychologia*, 37, 279-292.
- (17) Dillon, W. R., & Goldstein, M. (1984). *Multivariate analysis: Methods and applications*. New York: John Wiley & Sons.
- (18) Edelman, S. (1995). Representation of similarity in three-dimensional object discrimination. *Neural Computation*, 7, 408-423.
- (19) Farah, M. J., & Hammond, K. M. (1988). Mental rotation and orientation-invariant object recognition: Dissociable processes. *Cognition*, 29, 29-46.
- (20) Farah, M. J., Humphreys, G. W., & Rodman, H. R. (1999). Object and face recognition. In M. J. Zigmond, F. E. Bloom, S. C. Landis, J. L. Roberts, & L. R. Squire (Eds.), *Fundamental neuroscience*. San Diego, California: Academic Press.
- (21) Farah, M. J., Rochlin, R., & Klein, K. L. (1994). Orientation invariance and geometric primitives in shape recognition. *Cognitive Science*, 18, 325-344.
- (22) Feldman, J. (1997). The structure of perceptual categories. *Journal of*

- Mathematical Psychology*, 41, 145-170.
- (23) Gauthier, I., & Tarr, M. J. (1997). Orientation priming of novel shapes in the context of viewpoint-dependent recognition. *Perception*, 26, 51-73.
- (24) Gibson, J. J. (1962). Observations on active touch. *Psychological Review*, 69(6), 477-491.
- (25) Goodale, M. A., & Humphrey, G. K. (1998). The objects of action and perception. *Cognition*, 67(1-2), 181-207.
- (26) Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, 15, 20-25.
- (27) Grafton, S. T., Fadiga, L., Arbib, M. A., & Rizzolatti, G. (1997). Premotor cortex activation during observation and naming of familiar tools. *Neuroimage*, 6, 231-236.
- (28) Hummel, J. E. (1994). Reference frames and relations in computational models of object recognition. *Current Directions in Psychological Science*, 3, 111-116.
- (29) Hummel, J. E., & Biederman, I. (1992). Dynamic binding in a neural network for shape recognition. *Psychological Review*, 99(3), 480-517.
- (30) Hummel, J. E., & Stankiewicz, B. J. (1996). Categorical relations in shape perception. *Spatial Vision*, 10(3), 201-236.
- (31) Humphrey, G. K., & Khan, S. C. (1992). Recognizing novel views of three-dimensional objects. *Canadian Journal of Psychology*, 46, 170-190.
- (32) Humphreys, G. W., Price, C. J., & Riddoch, M. J. (1999). From objects to names: A cognitive neuroscience approach. *Psychological Science*, 62, 118-130.
- (33) Humphreys, G. W., & Riddoch, M. J. (1994). Attention to within-object and between-object spatial representations: Multiple sites for visual selection. *Cognitive Neuropsychology*, 11(2), 207-241.
- (34) Jeannerod, M. (1997). *The cognitive neuroscience of action*. Oxford: Blackwell Publishers Ltd.
- (35) Klein, R. (1982). Pattern of perceived similarity cannot be generalized from long to short exposure durations and vice versa. *Perception and Psychophysics*, 32, 15-18.
- (36) Kosslyn, S. M., Alpert, N. M., Thompson, W. L., Chabris, C. F., Rauch, S. L., & Anderson, A. K. (1994). Identifying objects seen from different viewpoints: A

PET investigation. *Brain*, 117, 1055-1071.

- (37) Leek, E. C. (1998). Effects of stimulus orientation on the identification of common polyoriented objects. *Psychonomic Bulletin & Review*, 5(4), 650-658.
- (38) Leibowitz, H., & Bourne, L. E. J. (1956). Time and intensity as determiners of perceived shape. *Journal of Experimental Psychology*, 51, 277-281.
- (39) Leyton, M. (1992). *Symmetry, Causality, Mind*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- (40) Leyton, M. (1999). New foundations for perception. In E. Lepore & Z. Pylyshyn (Eds.), *What is Cognitive Science?* (pp. 121-171). Blackwell Publishers: Oxford.
- (41) Liu, Z. (1996). Viewpoint dependency in object representation and recognition. *Spatial Vision*, 9(4), 491-521.
- (42) Lockhart, R. S., & Murdock, B. B. (1970). Memory and the theory of signal detection. *Psychonomic Bulletin*, 74, 100-109.
- (43) Loftus, G. R., & Masson, M. E. J. (1994). Using confidence intervals in within-subject designs. *Psychonomic Bulletin and Review*, 1, 476-490.
- (44) Marr, D. (1982). *Vision*. San Francisco: W. H. Freeman. [乾敏郎, 安藤広志訳: ビジョンー視覚の計算と脳内表現ー, 産業図書 (1987)]
- (45) Marr, D., & Nishihara, H. K. (1978). Representation and recognition of the spatial organization of three-dimensional shapes. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 200, 269-294.
- (46) McKoon, G., Ratcliff, R., & Dell, G. S. (1986). A critical evaluation of the semantic-episodic distinction. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 12, 295-306.
- (47) McMullen, P. A., & Jolicoeur, P. (1992). Reference frame and effects of orientation on finding the tops of rotated objects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 807-820.
- (48) Milner, A. D., & Goodale, M. A. (1995). *The Visual Brain in Action*. Oxford: Oxford University Press.
- (49) Miyashita, Y. (1993). Inferior temporal cortex: where visual perception meets memory. *Annual Review of Neuroscience*, 16, 245-263.
- (50) Murphy, K. J., Carey, D. P., & Goodale, M. A. (1998). The perception of spatial relations in a patient with visual form agnosia. *Cognitive Neuropsychology*, 15,

705-722.

- (51) Palmer, S., Rosch, E., & Chase, P. (1981). Canonical perspective and the perception of objects. In J. B. Long & A. D. Baddeley (Eds.), *Attention and performance IX* (pp. 135-151). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- (52) Palmer, S. E. (1989). Reference frames in the perception of shape and orientation. In B. E. Shepp & S. Ballesteros (Eds.), *Object Perception: Structure and Process* (pp. 121-163). Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- (53) Perenin, M. T., & Vighetto, A. (1988). Optic ataxia: a specific disruption in visuomotor mechanisms. I. Different aspects of the deficits in reaching for objects. *Brain*, 111, 643-674.
- (54) Perrett, D. I., Oram, M. W., & Ashbridge, E. (1998). Evidence accumulation in cell populations responsive to faces: an account of generalisation of recognition without mental transformations. *Cognition*, 67, 111-145.
- (55) Quinlan, P. T. (1991). Differing approaches to two-dimensional shape recognition. *Psychological Bulletin*, 109(2), 224-241.
- (56) Riddoch, M. J., & Humphreys, G. W. (1987). Visual object processing in optic aphasia: A case of semantic access agnosia. *Cognitive Neuropsychology*, 4(2), 131-185.
- (57) Rivlin, E., Dickinson, S. J., & Rosenfeld, A. (1995). Recognition by functional parts. *Computer Vision and Image Understanding*, 62(2), 164-176.
- (58) Rock, I. (1973). *Orientation and form*. New York: Academic Press.
- (59) Rock, I. (1974). The perception of disoriented figures. *Scientific American*, 230, 78-85.
- (60) Rock, I., & Heimer, W. (1957). The effect of retinal and phenomenal orientation of the perception of form. *The American Journal of Psychology*, 70(4), 493-511.
- (61) Sakata, H., & Taira, M. (1994). Parietal control of hand action. *Current Opinion in Neurobiology*, 4(6), 847-856.
- (62) Shepard, R. N., & Cooper, L. A. (1982). *Mental Images and Their Transformations*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- (63) Sirigu, A., Duhamel, J.-R., & Poncet, M. (1991). The role of sensorimotor experience in object recognition: A case of multimodal agnosia. *Brain*, 114,

2555-2573.

- (64) Snodgrass, J. G., & Corwin, J. (1988). Pragmatics of measuring recognition memory: Applications to dementia and amnesia. *Journal of Experimental Psychology: General*, 117, 34-50.
- (65) 杉尾武志・乾敏郎 (1995a). 記憶表象の先行学習依存性. 電子情報通信学会技術研究報告. PRU95-90, 67-72.
- (66) 杉尾武志・乾敏郎 (1995b). 図形の脳内表現の先行課題依存性. 日本心理学会第 59 回大会発表論文集, 722.
- (67) Tagaris, G. A., Kim, S.-G., Strupp, J. P., Andersen, P., Ugurbil, K., & Georgopoulos, A. P. (1997). Mental rotation studied by functional magnetic resonance imaging at high field (4 Tesla): Performance and cortical activation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9(4), 419-432.
- (68) Tanaka, K. (1996). Inferotemporal cortex and object vision. *Annual Review of Neuroscience*, 19, 109-139.
- (69) Tarr, M. J. (1995). Rotating objects to recognize them: A case study on the role of viewpoint dependency in the recognition of three-dimensional objects. *Psychonomic Bulletin and Review*, 2(1), 55-82.
- (70) Tarr, M. J., & Bülthoff, H. H. (1995). Is human object recognition better described by geon structural descriptions or by multiple views? Comment on Biederman and Gerhardstein (1993). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(6), 1494-1505.
- (71) Tarr, M. J., & Bülthoff, H. H. (1998). Image-based object recognition in man, monkey and machine. In M. J. Tarr & H. H. Bülthoff (Eds.), *Object recognition in man, monkey, and machine* (pp. 1-20). Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- (72) Tarr, M. J., & Gauthier, I. (1998). Do viewpoint-dependent mechanisms generalize across members of a class? *Cognition*, 67, 71-108.
- (73) Tarr, M. J., & Pinker, S. (1989). Mental rotation and orientation-dependence in shape recognition. *Cognitive Psychology*, 21, 233-282.
- (74) Turnbull, O. H. (1997). A double dissociation between knowledge of object identity and object orientation. *Neuropsychologia*, 35(4), 567-570.
- (75) Turnbull, O. H., Beschin, N., & Della Sala, S. (1997). Agnosia for object orientation: Implications for theories of object recognition. *Neuropsychologia*,

35(2), 153-163.

- (76) Turnbull, O. H., Laws, K. R., & McCarthy, R. A. (1995). Object recognition without knowledge of object orientation. *Cortex*, 31, 387-395.
- (77) Ullman, S. (1989). Aligning pictorial descriptions: an approach to object recognition. *Cognition*, 32, 193-254.
- (78) Ullman, S. (1992). The visual recognition of three-dimensional objects. In D. E. Meyer & S. Kornblum (Eds.), *Attention and Performance XIV: Synergies in Experimental Psychology, Artificial Intelligence, and Cognitive Neuroscience*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- (79) Ullman, S. (1996). *High-level vision*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- (80) Ungerleider, L. G., & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In D. J. Ingle, M. A. Goodale, & R. J. W. Mansfield (Eds.), *Analysis of Visual Behavior* (pp. 549-586). Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- (81) Vetter, T., & Poggio, T. (1994). Symmetric 3D objects are an easy case for 2D object recognition. *Spatial Vision*, 8(4), 443-453.
- (82) Vetter, T., Poggio, T., & Bülthoff, H. H. (1994). The importance of symmetry and virtual views in three-dimensional object recognition. *Current Biology*, 4, 18-23.
- (83) Wallis, G. (1996). *How neurons learn to associate 2D-views in invariant object recognition* (Tech. Rep. No. 37). Tübingen, Germany: Max-Planck-Institut für Biologische Kybernetik.
- (84) Wallis, G., & Bülthoff, H. H. (1999). Learning to recognize objects. *Trends in Cognitive Sciences*, 3(1), 22-31.
- (85) Warrington, E. K., & James, M. (1986). Visual object recognition in patients with right-hemisphere lesions: axes or features? *Perception*, 15, 355-366.
- (86) Warrington, E. K., & Taylor, A. M. (1978). Two categorical stages of object recognition. *Perception*, 7, 695-705.
- (87) Webster, M. J., Bachevalier, J., & Ungerleider, L. G. (1994). Connections of inferior temporal areas TEO and TE with parietal and frontal cortex in macaque monkeys. *Cerebral Cortex*, 4(5), 470-483.

研究業績

論文・総説

- [1] Sugio, T., Inui, T., Matsuo, K., Matsuzawa, M., Glover, G. H., & Nakai, T. (1999).
The role of the posterior parietal cortex in human object recognition: a functional magnetic resonance imaging study. *Neuroscience Letters*, 276(1), 45-48.
- [2] Sugio, T., & Inui, T. (印刷中). Representing spatial layouts and spatial locations of features in shape recognition. *認知科学*.
- [3] 杉尾武志・乾敏郎 (1998). 視覚パターン認知. *Brain Medical*, 10(1), 33-38.

研究技術報告

- [1] 杉尾武志・乾敏郎 (1995). 記憶表象の先行学習依存性. 電子情報通信学会技術研究報告. PRU95-90, 67-72.
- [2] 杉尾武志・乾敏郎 (1997). 図形の変換情報の内部表現と認識への制御的役割. 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU97-165, 99-106.
- [3] 杉尾武志・乾敏郎・松尾香弥子・松沢正子・中井敏晴 (1999). 機能的 MRI を用いた物体認識における背側視覚経路の役割の検討. 電子情報通信学会技術研究報告. HIP99-11, 19-24.

学会発表

- [1] Sugio, T., Inui, T., Matsuo, K., Matsuzawa, M., & Nakai, T. (1999). Differential activation in recognition of canonical and noncanonical object views observed at 3T. Fifth International Conference on Functional Mapping of the Human Brain. Düsseldorf.
- [2] 杉尾武志・乾敏郎 (1995). 図形の脳内表現の先行課題依存性. 日本心理学会

第 59 回大会発表論文集, 722.

- [3] 杉尾武志・乾敏郎 (1997). 図形認知における変換情報の表現. 日本心理学会 61 大会発表論文集, 615.
- [4] 杉尾武志・乾敏郎 (1998). 図形の構造的要因による主方位の決定. 日本心理学会 62 大会発表論文集, 634.
- [5] 杉尾武志・乾敏郎・松尾香弥子・松沢正子・中井敏晴 (1999). 機能的 MRI を用いた物体認識の視点依存性に関わる脳内領域の検討. 日本心理学会 63 大会発表論文集, 309.